



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

Hook-up 설치 중 계류시스템의 동적 해석에 관한 연구

A Study on the Dynamic Analysis of Mooring System
During Hook-up Installation



지도교수 조 효 제

2020년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

이 민 준

본 논문을 이민준의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 이 성 욱 (인)

위 원 조 효 제 (인)

위 원 이 승 재 (인)

2019년 12월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
1. 서론	
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	2
1.3 연구내용	3
2. 프로그램 개발	
2.1 운동방정식	4
2.2 파랑 강제력	5
2.3 계류 해석	5
2.3.1 집중질량법 (Lumped Mass Method, LMM)	6
2.3.2 복원계수행렬 산정법	6
2.4 풍력 및 조류력	7
2.5 예인선 알고리즘	8
2.6 해석 절차	10

3. 프로그램 검증

3.1 모델 정의	11
3.2 계류시스템 정의	12
3.3 운동응답에 대한 검증	13
3.4 예인선 알고리즘에 대한 검증	15

4. Hook-up 시뮬레이션

4.1 Hook-up 설치 개요	16
4.1.1 해양설치작업선(AHTS)	16
4.1.2 일반적인 Hook-up 절차	17
4.2 외력 환경 조건	18
4.3 Hook-up 시뮬레이션 without Tug boats	19
4.3.1 Case 1) Exciting force : Wave	19
4.3.2 Case 2) Exciting force : Current	22
4.3.3 Case 3) Exciting force : Wind	23
4.4 Hook-up 시뮬레이션 with Tug boats	24
4.5 해석 결과	37

5. 결론

참고문헌

List of Tables

Table 3.1	Main dimension of barge	11
Table 3.2	Main dimension of Mooring line	12
Table 4.1	Hook-up procedure table	18
Table 4.2	Hook-up installation procedure	18
Table 4.3	Environmental condition	19
Table 4.4	Load case without tug boat	19
Table 4.5	Main dimension of tug boat	25



List of Figures

Fig. 1.1 Offshore site installation process	1
Fig. 1.2 Module of calculation for analysis	3
Fig. 2.1 Mooring analysis process	6
Fig. 2.2 Example of lumped mass method	7
Fig. 2.3 Wind & Current coefficients	8
Fig. 2.4 Tug boat algorithm (MOSES) <Before>	9
Fig. 2.5 Tug boat algorithm (MOSES) <After>	9
Fig. 2.6 Initial position of tug boat	9
Fig. 2.7 Flowchart of tug boat calculation	10
Fig. 2.8 Program analysis process	10
Fig. 3.1 Barge model	11
Fig. 3.2 Mooring layout	12
Fig. 3.3 Surge motion response	13
Fig. 3.4 Heave motion response	13
Fig. 3.5 Roll motion response	14
Fig. 3.6 Time history of surge motion	14
Fig. 3.7 Tug boat validation	15
Fig. 3.8 Time history of yaw motion (with tug boat)	15
Fig. 4.1 Sequence of AHTS operating	17
Fig. 4.2 Pre-laid installation before hook-up operation	17
Fig. 4.3 x -offset of barge during hook-up operation	20
Fig. 4.4 Second order wave force spectrum with surge	20
Fig. 4.5 y -offset of barge during hook-up operation	21
Fig. 4.6 θ_z -offset of barge during hook-up operation	21
Fig. 4.7 Time history of θ_z -offset	21
Fig. 4.8 x -offset of barge during hook-up operation	22
Fig. 4.9 y -offset of barge during hook-up operation	22
Fig. 4.10 θ_z -offset of barge during hook-up operation	23
Fig. 4.11 x -offset of barge during hook-up operation	23
Fig. 4.12 y -offset of barge during hook-up operation	24
Fig. 4.13 θ_z -offset of barge during hook-up operation	24
Fig. 4.14 Tug boats layout	25

Fig. 4.15 Time history of x -offset with tug 4 (None)	25
Fig. 4.16 Time history of second order wave force($F_{wave}^{(2)}$)	26
Fig. 4.17 Time history of y -offset with tug 4 (None)	26
Fig. 4.18 Time history of θ_z -offset with tug 4 (None)	26
Fig. 4.19 Time history of x -offset with tug 4 (#4→#13)	27
Fig. 4.20 Time history of y -offset with tug 4 (#4→#13)	28
Fig. 4.21 Time history of θ_z -offset with tug 4 (#4→#13)	28
Fig. 4.22 Time history of x -offset (4T 100%)	29
Fig. 4.23 Time history of y -offset (4T 100%)	29
Fig. 4.24 Time history of θ_z -offset (4T 100%)	29
Fig. 4.25 Time history of x -offset (#3→#14)	30
Fig. 4.26 Time history of y -offset (#3→#14)	30
Fig. 4.27 Time history of θ_z -offset (#3→#14)	31
Fig. 4.28 Time history of x -offset (8T 100%)	32
Fig. 4.29 Time history of y -offset (8T 100%)	32
Fig. 4.30 Time history of θ_z -offset (8T 100%)	32
Fig. 4.31 Time history of x -offset (#2→#15)	33
Fig. 4.32 Time history of y -offset (#2→#15)	33
Fig. 4.33 Time history of θ_z -offset (#2→#15)	34
Fig. 4.34 Time history of x -offset (12T 100%)	34
Fig. 4.35 Time history of y -offset (12T 100%)	35
Fig. 4.36 Time history of θ_z -offset (12T 100%)	35
Fig. 4.37 Time history of x -offset (#1→#16)	35
Fig. 4.38 Time history of y -offset (#1→#16)	36
Fig. 4.39 Time history of θ_z -offset (#1→#16)	36
Fig. 4.40 Time history of x -offset (16T 100%)	37
Fig. 4.41 Time history of y -offset (16T 100%)	37
Fig. 4.42 Time history of θ_z -offset (16T 100%)	37
Fig. 4.43 Result of x -offset during hook-up installation	38
Fig. 4.44 Result of y -offset during hook-up installation	38
Fig. 4.45 Result of θ_z -offset during hook-up installation	39

A Study on the Dynamic Analysis of Mooring System During Hook-up Installation

Lee, Min Jun

*Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University*

Abstract

This paper has conducted research on Hook-up installation of offshore site installation process. Hook-up installation is the final step in offshore site installation process, and conducted with AHTS(Anchor Handling Tug Supply vessel) which retrieve the bottom line and tug boat for station keeping. During Hook-up installation, the offshore structure can have a detrimental effect on work stability due to low frequency motion and economic costs can be occurred by increasement of available days of tug boat. This study developed a numerical analysis program for the dynamic behavior of mooring systems during hook-up installation to review the generally performed installation process and determine when the tug boat should be released. In this program, the behavior of offshore structure is calculated by Cummin's time domain motion equation and the mooring systems are calculated by Lumped Mass Method(LMM). In addition, the program is calculated by tug boat algorithm for hook-up installation. The model used in the calculations is barge

type assuming FPSO and has a taut mooring system with 16 moorings connected. The hook-up simulation calculates offset of the structure according to the number of tug boats, and the calculation result is shown using significant value. The hook-up installation procedure was constructed so that the offset of the structure does not exceed 6 m, and the released timing of tug boats was decided considering the stability and economic aspects of the structure.

KEY WORDS: Hook-up installation hook-up설치작업, Mooring line 계류삭, Tug boat 예인선, Dynamic analysis 동적 해석, Station keeping 위치유지, Algorithm 알고리즘, Validation 검증, Frequency response 주파수응답, Taut mooring 인장강식 계류



제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 목적

해저 석유 개발을 목적으로 운용하는 부유식 해양구조물은 가동 해역의 환경에 따라 계류삭(Mooring line), 동적위치제어시스템(Dynamic positioning system) 등 다양한 방식의 계류시스템을 사용한다. 부유식 해양구조물의 안정적인 요구 성능 조건을 충족시키기 위한 위치 유지 방식으로 계류삭을 이용하는 것이 일반적이다. 통상적인 계류시스템의 설치 절차는 Fig. 1.1과 같이 크게 4가지 단계로 구분한다. 우선 해저면에 앵커과일을 설치(Anchor installation)하고 앵커과일과 체결한 계류삭을 해저면에 배열(Pre-laying installation)한다. 다음 단계로 건조된 해양구조물을 설치 해역으로 이송(Transportation)한 후 해저면에 미리 배열했던 계류삭을 인양하여 해양구조물에 연결하면(Hook-up installation) 계류시스템의 설치 작업이 완료된다.

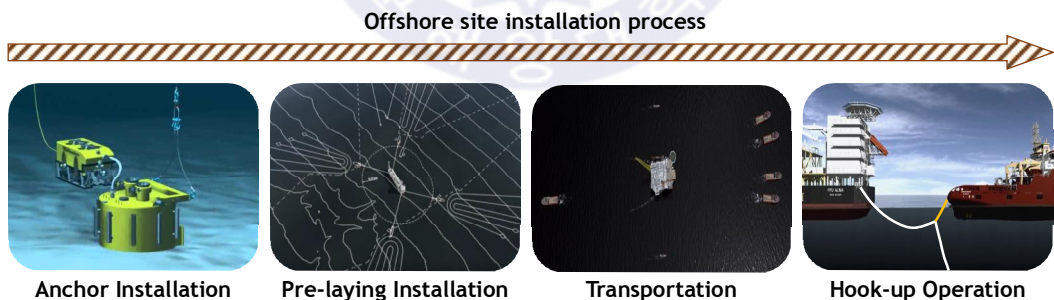


Fig. 1.1 Offshore site installation process

계류시스템의 설치 작업은 부유식 해양구조물의 안정적인 운용을 위해 필수적으로 거치는 단계이다. 그러나 각 선급 및 인증기관에서는 이러한 설치 작업에 대해 설치 기간에 따른 외력환경 조건만을 제시하고, 이외 설치 작업 중 안정성, 설치 계획 등의 관련 규정은 전무한 상황이다. 특히 해저면에 배열했던

계류삭들을 부유식 해양구조물에 연결하는 Hook-up 설치 단계에서 각 계류삭들의 변동 장력으로 인해 발생할 가능성이 높은 저주파수 운동(Low frequency motion)은 작업안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 검토가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 심해역에서 인장강식 계류 시스템(Taut mooring system)을 갖는 부유식 해양 구조물의 Hook-up 설치 과정에 대한 수치해석 프로그램을 개발하여 작업안정성과 관련된 계류시스템의 동적 해석을 수행하였다.

1.2 연구동향

趙孝濟(1991)는 계류시스템을 갖는 부유식 해양구조물의 동적 응답 특성을 그린함수(Green function)를 이용해 도출된 주파수영역의 해석 결과를 운동방정식에 적용하는 시간영역 해석 프로그램을 개발하여 시뮬레이션 하였으며, 그 결과를 Pinkster의 이론식 결과 및 모형 실험결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다. 또한 부유식 해양구조물의 안정적인 운용을 위해 사용하는 계류시스템의 해석 방법으로 집중질량법(Lumped Mass Method)과 유한요소법(Finite Element Method) 등이 사용된다. 집중질량법은 Van den Boom, H.(1985)에 의해 소개된 바 있으며 계산과정이 상대적으로 간단하고 계산시간이 빠르다는 장점이 있다.(Huang, 1994) 유한요소법을 이용한 계류시스템 해석은 탄성, 굽힘, 비틀림을 고려한 계류삭의 정교한 해석 결과를 도출할 수 있다는 장점을 갖는다.(Y.J. Son, 2012)

해양에서 이루어지는 계류 설치 작업에 대하여 Lee (2011)는 바지선을 이용한 트러스 스파(Truss spar)의 운송 중 동적 거동에 관한 연구를 수행하였으며, Song and Kim (2018)은 심해역을 대상으로 흡착식 앵커파일(Suction anchor pile)의 설치가능 여부를 파악하기 위해 바지선에서 앵커파일을 들어 올리는 단계(Pick-up), 수면을 통과시키는 단계(Lowering through splash zone), 해저면까지 내리는 단계(Landing)로 구분하여 연구하였다. 또한 Yoon and Kim(2018)은 작업 한계 환경 조건 및 안전성 등의 검토를 위하여 심해역에 적용되는 섬유로프 계류시스템의 사전설치에 대한 연구를 수행하였다.

1.3 연구내용

계류삭이 설치되는 과정을 해석하기 위해서는 Fig 1.2와 같은 계산 모듈이 요구된다. 앞서 언급한 바와 같이 趙孝濟(1991)는 부유체의 운동 응답을 계산하기 위해 주파수 영역에서의 해석 결과를 이용한 시간 영역에서의 해석 모듈을 개발하고 이에 대한 신뢰성을 검증한 바 있다. 본 연구는 趙孝濟(1991)에 의해 개발된 프로그램을 기반으로 심해역에서 인장강식 계류 시스템을 가지는 부유식 해양구조물의 Hook-up 설치 과정에 대한 수치해석 프로그램을 개발하여 일반적으로 수행되는 Hook-up 설치 과정에 대해 분석 및 검토하였다. 또한 시뮬레이션 해석 결과를 바탕으로 Hook-up 설치 과정 중 구조물의 위치유지를 위해 사용되는 예인선에 대한 철수 시점을 결정하였다. 다음으로 프로그램 개발에 사용한 이론은 2장에서 자세히 언급하고, 프로그램 신뢰성에 대한 검증은 상용 프로그램인 MOSES와 비교하여 3장에 나타냈다. 그리고 4장에서는 일반적으로 수행되는 Hook-up 설치 작업에 대해 소개하고 각각의 절차에 대한 시뮬레이션 해석 결과를 나타냈다. 이때 시뮬레이션은 예인선의 유무에 따라 해석을 진행하였다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 최종 결론을 도출하였다.

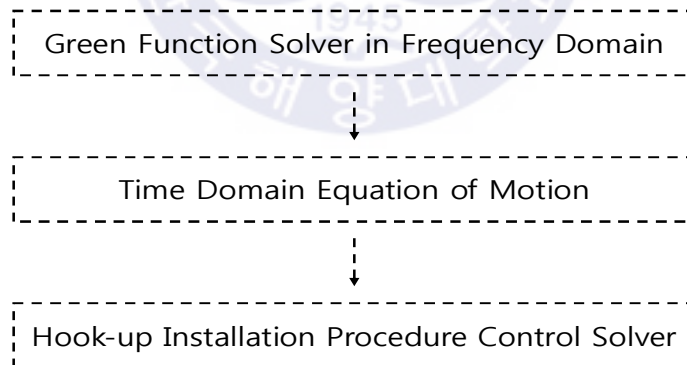


Fig. 1.2 Module of calculation for analysis

제 2 장 프로그램 개발

2.1 운동방정식

부유식 해양구조물의 운동을 해석하기 위한 방법으로 주파수 영역 해석과 시간 영역 해석이 존재한다. 주파수 영역 해석은 비교적 계산시간이 빠르다는 장점이 있지만 비교적 낮은 정도의 계산 결과를 나타낸다는 단점을 가지고, 시간 영역 해석은 주파수 영역 해석에 비해 높은 정도의 계산 결과를 나타내지만 계산 시간이 오래 걸린다는 단점을 가진다. 미국 석유회(American Petroleum Institute, API)에서는 2차 파랑 강제력으로 인한 부유체의 저주파수 운동을 정도 높게 평가하기 위해서는 시간 영역 해석이 필요하다고 언급한다. 본 연구에서의 부유체 운동 응답은 식 (1)과 같이 Cummins(1962)의 시간 영역 운동방정식을 적용하여 계산하였다.

$$\sum_{j=1}^6 [\{M_{kj} + m_{kj}(\infty)\}]\ddot{x}(t) + \int_0^t K_{kj}(t-\tau)\dot{x}_j(\tau)d\tau + C_{kj}x_j(t) = F_k(t) \quad (1)$$

$(k=1,2,\dots,6)$

여기서 M_{kj} 는 구조물의 질량, $m_{kj}(\infty)$ 는 무한대 주파수에서의 부가질량, $K_{kj}(t)$ 는 메모리 영향함수(Memory effect function), C_{kj} 는 복원계수, $F_k(t)$ 는 외력의 시간이력을 나타낸다. 무한대 주파수에서의 부가질량 $m_{kj}(\infty)$ 와 메모리 영향함수 $K_{kj}(t)$ 는 주파수 영역의 해석 결과로부터 계산이 수행되며, 이들은 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 정의된다.

$$m_{kj}(\infty) = m_{kj}(\omega) - \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} K_{kj}(\tau) \sin \omega \tau d\tau \quad (2)$$

$$K_{kj}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} b_{kj}(\omega) \cos \omega t d\omega \quad (3)$$

여기서 $m_{kj}(\omega)$ 와 $b_{kj}(\omega)$ 는 각각 주파수에 따른 부가질량과 조파감쇠계수이다. 메모리 영향함수는 조파감쇠계수의 푸리에 역변환을 이용하여 식 (3)과 같이 얻을 수 있고, 이를 이용하여 식 (2)와 같이 무한대 주파수에서의 부가질량을 계산할 수 있다.

2.2 파랑 강제력

파랑 강제력은 식 (4)와 같이 충격 응답함수(Impulse response function)와 수면변위(Wave elevation)를 합성곱 적분(Convolution Integral)하여 계산된다.

$$F_{wave}(t) = \int h(\tau)\zeta(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

여기서 $F_{wave}(t)$ 는 1차 파 강제력의 시간이력, $h(t)$ 는 충격 응답 함수, $\zeta(t)$ 는 수면변위를 나타낸다. $h(t)$ 는 주파수 영역의 해석결과인 파랑 강제력 전달 함수 $H(\omega)$ 를 푸리에 변환하여 얻을 수 있으며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int H(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (5)$$

2.3 계류해석

계류삭의 장력은 구조물의 운동방정식을 계산하여 얻은 변위, 속도, 가속도의 성분과 계류삭의 정보를 입력 값으로 하여 Fig. 2.1과 같이 계산이 수행된다. 운동방정식을 해석하여 얻은 구조물 변위를 이용하여 매 타임스텝마다 변화하는 페어리드 좌표(Fairlead point)를 계산한다. 계산된 페어리드 좌표와 계류삭의 길이, 강성, 앵커 좌표(Anchor point) 등의 정보를 입력받아 계류삭의 장력을 계산하고, 계산된 장력은 다음스텝의 외력 항에 추가하여 계산한다. 계류해석은 정적해석(Static analysis)이 수행된 후 동적해석(Dynamic analysis)이 수행되며, 정적해석은 식 (6)과 식(7)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$x(l) = \frac{TH}{\omega} [\sinh^{-1}(\frac{TV+\omega l}{TH}) - \sinh^{-1}(\frac{TV}{TH})] + \frac{TH}{K} l \quad (6)$$

$$z(l) = \frac{TH}{\omega} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{TV + \omega l}{TH} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{TV}{TH} \right)^2} \right] + \frac{TV}{K} l + \frac{\omega}{2K} l^2 \quad (7)$$

여기서 l 은 계류삭의 길이, $x(l)$ 과 $z(l)$ 은 계류삭 길이에 따른 노드의 x 방향 및 z 방향의 변위, TH 는 수평방향의 장력, TV 는 수직방향의 장력, ω 와 K 는 각각 계류삭의 단위 길이 당 무게와 축방향 강성을 의미한다. 본 연구는 이와 같은 식을 이용하여 정적해석을 수행한 후 집중질량법(Lumped Mass Method, LMM)을 적용하여 계류삭의 동적해석을 수행하였으며, 복원계수행렬 산정법으로 계산한 해석 결과와 집중질량법의 결과를 검증하였다.

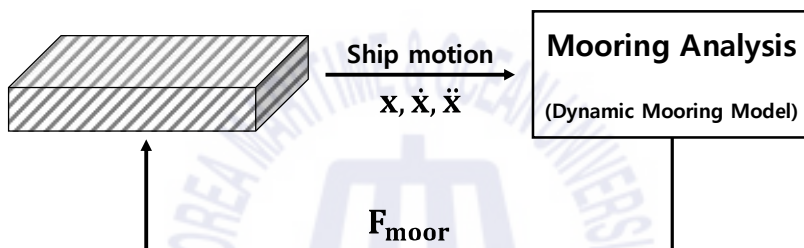


Fig. 2.1 Mooring analysis process

2.3.1 집중질량법 (Lumped Mass Method, LMM)

집중질량법은 Fig. 2.2과 같이 유한요소법을 기반으로 계류삭에 노드 개수에 따라 세그먼트를 나누어 각각의 노드점(Node)에 질량을 부과하고, 노드점 사이는 스프링이 직선으로 연결되어 있는 다자유도계 Mass-Spring System을 해석하는 방법이다. 이러한 집중질량법은 복잡한 계류시스템의 문제를 간소화하여 문제를 쉽게 접근할 수 있게 한다. 복잡한 형상의 계류 시스템일 경우 노드점 개수를 늘려 정도 높은 계산 수행이 가능하다.

2.3.2 복원계수행렬 산정법

Patel, M.H.(1982)은 인장강식 계류시스템을 갖는 부유체를 대상으로 계류로 인한 복원력을 추정하기 위해 6×6 복원계수 행렬을 제시하였다. 즉, Patel의 이론식을 이용하여 얻은 6×6 복원 계수행렬과 부유체의 변위를 곱함으로써 계류

삭의 변동 장력을 계산할 수 있다. Patel의 이론식을 이용한 장력계산은 식 (8)의 형태와 같다.

$$[F_T] = [K_{6 \times 6}][x] \quad (8)$$

여기서 F_T 는 계류삭의 변동 장력, $K_{6 \times 6}$ 는 복원 계수 행렬 그리고 x 는 구조물의 변위를 나타낸다. $K_{6 \times 6}$ 는 페어리드와 앵커 좌표, 계류삭의 강성 그리고 초기장력 따라 정의된다. Patel의 식은 쉽고 간단하며 인장강식 계류시스템에 대해 정도 높은 해석결과를 도출하지만 계류삭의 관성과 감쇠에 의한 영향을 고려하지 않는다.

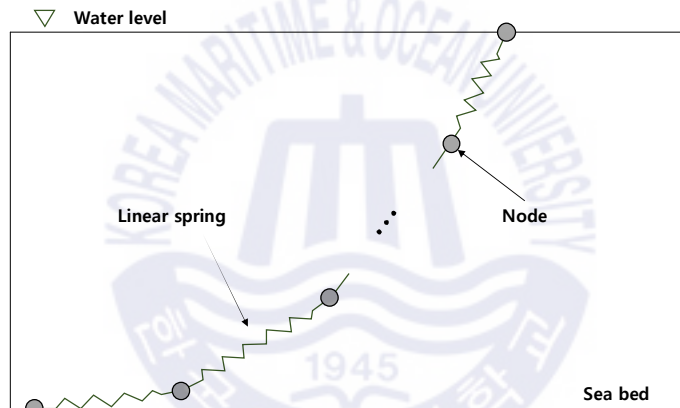


Fig. 2.2 Example of lumped mass method

2.4 풍력 및 조류력

구조물에 작용하는 풍력과 조류력은 각각의 속도와 부유체로 입사되는 힘의 작용 방향에 따라 결정된다. 힘이 작용하는 방향에 따라 풍력과 조류력의 계수, 그리고 각각의 힘이 구조물에 투영되는 면적의 크기가 달라진다. 풍력과 조류력은 각각 식 (9)와 식(10)과 같이 정의하고 입사각에 따른 투영면적의 변화는 식 (11)와 같이 정의한다.

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 \begin{bmatrix} C_X(\beta) A_X \\ C_Y(\beta) A_Y \\ C_\theta(\beta) A_\theta(\beta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_{air} V_w^2 \begin{bmatrix} C_X(\beta) A_X \\ C_Y(\beta) A_Y \\ C_\theta(\beta) A_\theta(\beta) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_\theta(\beta) = [(Breadth) \times \cos\beta + (Length) \times \sin\beta] \times (Depth) \quad (11)$$

여기서 F_c 와 F_w 는 각각 조류력과 풍력을 나타내고, ρ 는 밀도, V 는 속도, $C(\beta)$ 는 입사각(β)에 따른 조류력 및 풍력 계수, A 는 투영면적을 나타내며, 아래 첨자인 w 와 air 는 각각 물과 공기를 나타낸다. 식 (11)에 나타난 입사각(β)은 구조물의 회전방향 운동을 고려한 바람과 조류의 상대적인 입사각을 나타낸다. 각 힘의 입사각에 따른 조류력 및 풍력 계수는 Fig. 2.3과 같다.

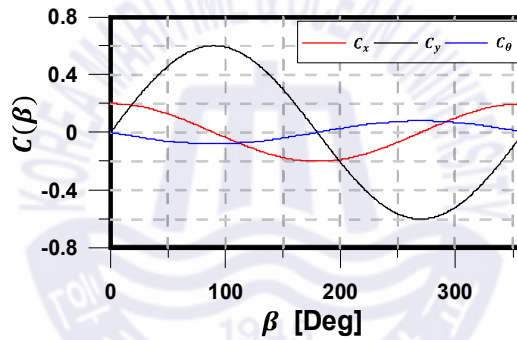


Fig. 2.3 Wind & Current coefficients

2.5 예인선 알고리즘

계류 설치 작업 중 예인선은 구조물이 이송되는 작업(Transportation)부터 Hook-up 설치 작업까지 사용된다. Hook-up 설치 작업 진행 시 각각의 예인선은 구조물의 위치유지를 위해 사용되며 예인선으로부터 요구되는 추력과 예인 방향은 매 시각 불규칙하게 변동한다. MOSES에서 구동되는 예인선 알고리즘의 경우 예인선 최대 추력과 절대좌표계에서의 일정한 방향을 입력받아 해석이 진행되고 이에 대한 해석 예시를 Fig. 2.4과 Fig. 2.5와 같이 나타냈다. Fig. 2.4은 MOSES에서 두 개의 계류사를 구조물에 연결한 후 예인선 4대를 배치한 그림이다. 즉, 구조물은 계류사의 변동 장력으로부터 작용하는 반시계방향의 회전모

멘트로 인해 회전운동이 발생하고, 이를 4대의 예인선을 이용해 회전운동을 제어하도록 배치하였다. 그러나 Fig. 2.5와 같이 예인선의 예인방향은 해석 전후의 변화 없이 초기 입력된 예인방향이 그대로 유지되는 것을 볼 수 있다.

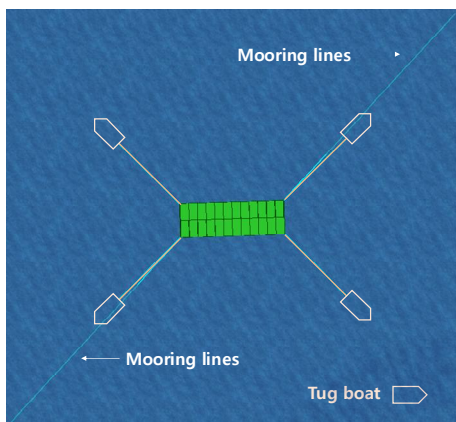


Fig. 2.4 Tug boat algorithm (MOSES)
<Before>

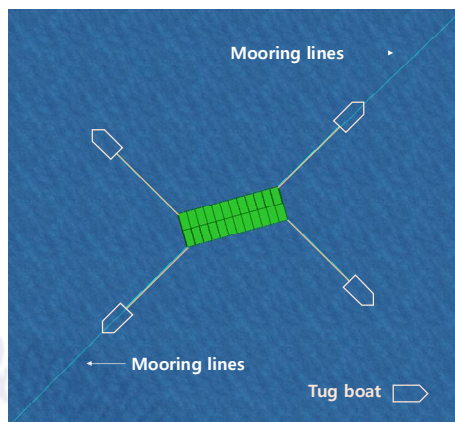


Fig. 2.5 Tug boat algorithm (MOSES)
<After>

그리고 본 연구에서 사용한 예인선의 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 Fig. 2.6과 같이 예인선이 구조물에 연결되어 있는 초기 좌표를 (x_0, y_0) , 외력으로 인해 이동한 좌표를 (x_n, y_n) 이라 했을 때, 예인선은 초기 좌표를 되찾아 가기 위하여 이동한 좌표와 초기 좌표의 변화량에 비례하여 추력을 계산된다. 이때 계산된 추력은 예인선의 최대 용량을 넘지 않으며, 계산이 끝난 후 예인선과 구조물이 이루고 있는 위치와 각도를 계산하여 다음 스텝에서의 초기조건으로 사용한다. 단, 예인선의 추력에 의한 구조물의 운동은 평면상에서의 운동(x, y, θ_z)만을 고려하고, 외력환경에 의한 예인선의 거동은 무시하였다. 앞서 설명한 예인선의 알고리즘은 Fig. 2.7와 같이 정리하였다.

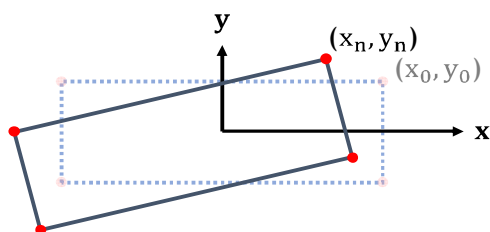


Fig. 2.6 Initial position of tug boat

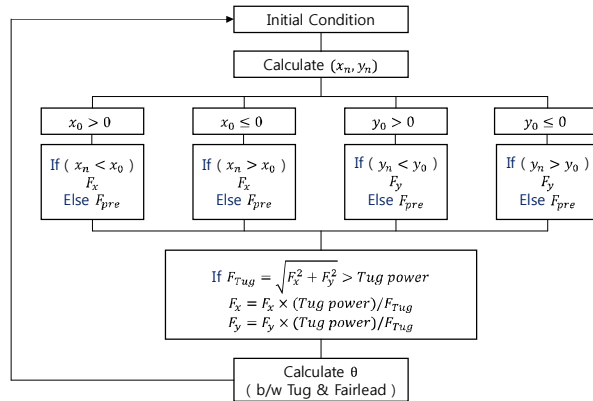


Fig. 2.7 Flowchart of tug boat calculation

2.6 해석 절차

Fig. 2.8은 본 연구에서 개발한 프로그램의 해석 절차를 도식화한 것이다. 주파수 영역의 해석 결과로부터 도출된 부가질량 $m_{kj}(\omega)$, 조파감쇠계수 $b_{kj}(\omega)$, 외력의 전달함수 $H(\omega)$ 를 개발한 프로그램에 입력 값으로 하여 무한대 주파수에서의 부가질량 $m_{kj}(\infty)$, 메모리영향함수 $K_{kj}(t)$, 파랑 강제력의 시간이력 $F_{wave}(t)$ 을 계산한다. 다음으로 바람, 조류, 예인선의 정보를 적용하여 각각의 외력을 계산하고, 이들을 운동방정식 외력 항에 포함하여 시뮬레이션을 수행한다. 이후 시뮬레이션 결과인 구조물의 변위, 속도, 가속도 정보 및 계류삭의 정보를 입력 값으로 하여 계류삭의 변동 장력 F_{moor} 를 계산한 후 다음 스텝의 운동방정식 외력 항에 포함하여 반복계산을 수행한다.

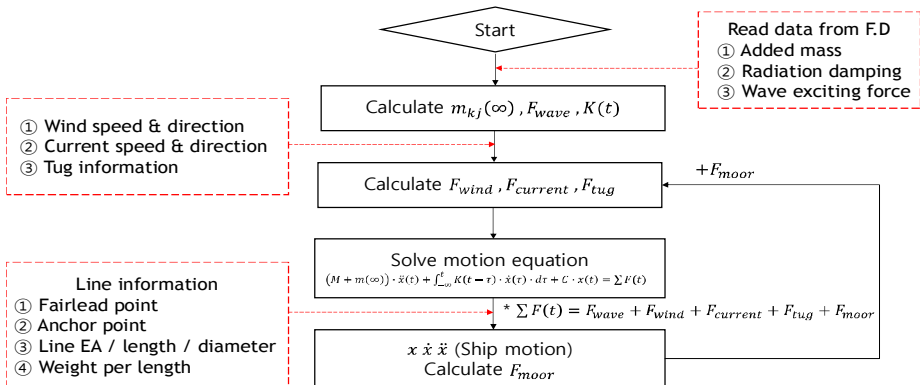


Fig. 2.8 Program analysis process

제 3 장 프로그램 검증

3.1 모델 정의

본 논문에서 사용하는 구조물은 FPSO(Floating Production Storage and Offloading)을 가정한 바지(Barge) 모델이다. 모델의 주요 제원과 형상은 각각 Table 3.1과 Fig. 3.1에 나타냈다.

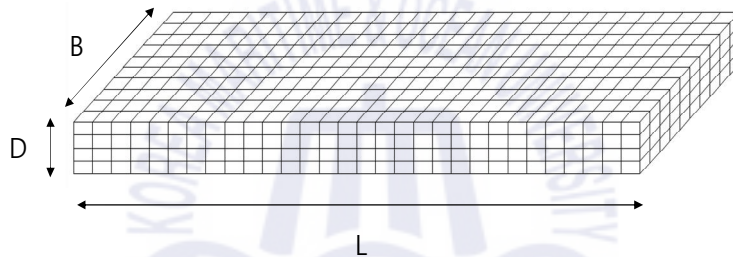


Fig. 3.1 Barge model

Table 3.1 Main dimension of barge

Description	Magnitude
Length between perpendicular [m]	120
Breadth [m]	40
Depth [m]	10
Draft [m]	8
Center of gravity [m]	8
Water depth [m]	1000
Weight [ton]	38400
Radius of gyration around X-axis [m]	12.32
Radius of gyration around Y-axis [m]	35.29
Radius of gyration around Z-axis [m]	36.94

3.2 계류시스템 정의

계류시스템은 인장강식 계류로 섬유로프(Synthetic fiber rope)의 재료적 특성을 갖는다. 그리고 계류시스템의 배치는 Fig. 3.2와 같이 16개의 계류삭이 각각 4개씩 4개의 번들(Bundle)로 구성되며 방사형 구조(Spread Mooring System)를 가진다. 계류삭의 제원은 Table 3.2와 같다.

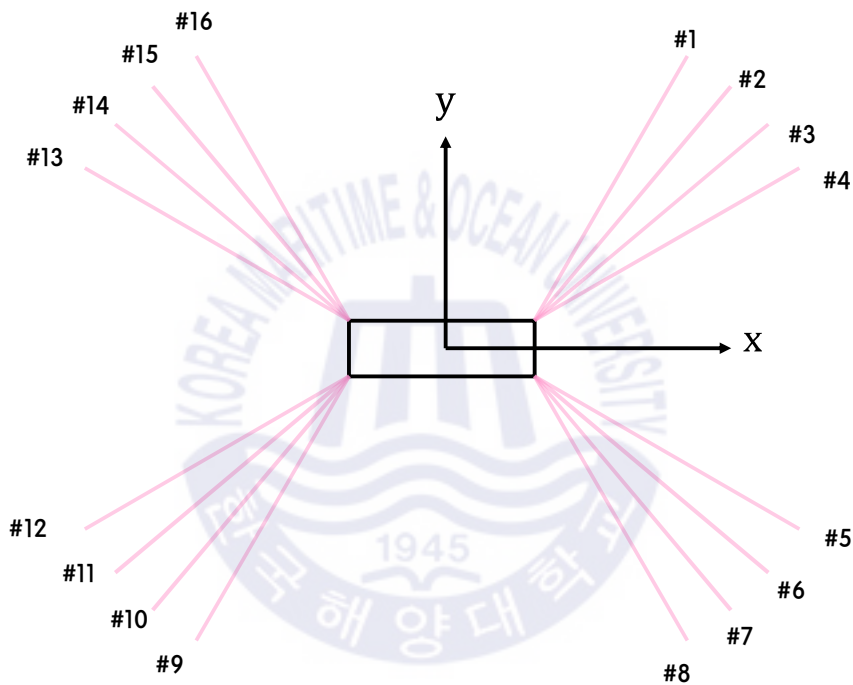


Fig. 3.2 Mooring layout

Table 3.2 Main dimension of Mooring line

Description	Magnitude
Elasticity [MN]	300
Initial Length [m]	1211.64
Weight/Length [kg/m]	7
Diameter [m]	0.178
Number of Line	16
Pretension [kN]	2200

3.3 운동응답에 대한 검증

본 연구에서 개발한 프로그램(LMM)의 해석 결과를 검증하기 위하여 계류삭이 연결된 구조물의 운동응답을 상용프로그램인 MOSES의 해석결과 및 Patel의 이론식 결과와 비교하였다. MOSES를 이용하여 구조물에 16개의 계류삭이 연결되어 있을 때의 주파수 응답(Frequency response)을 계산하고, 개발된 프로그램에서 파 진폭 1m, 주파수 범위는 0.025 ~ 1.45 rad/sec로 0.025 rad/sec의 간격으로 계산하여 Fig. 3.3 ~ Fig. 3.5과 같이 비교하였다. 각각의 그림은 횡파에서의 Sway, Heave, Roll에 대한 운동응답을 나타내고 있으며, 개발된 프로그램과 상용프로그램 및 Patel의 이론식 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

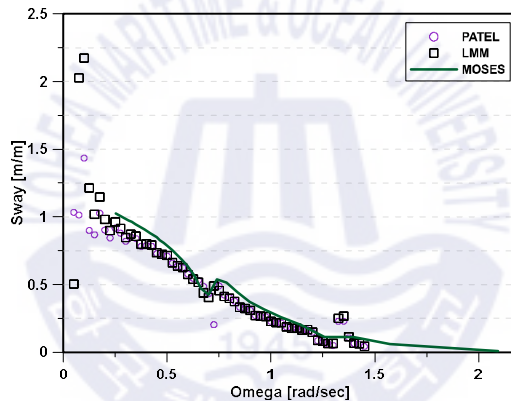


Fig. 3.3 Surge motion response

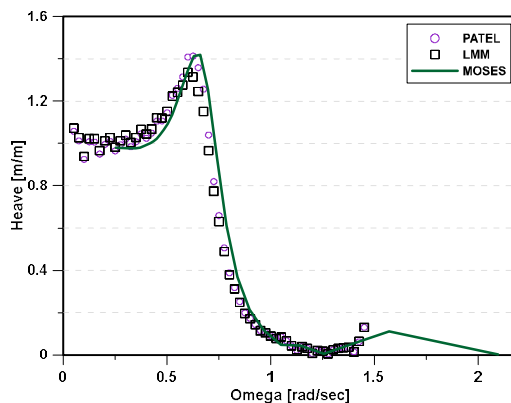


Fig. 3.4 Heave motion response

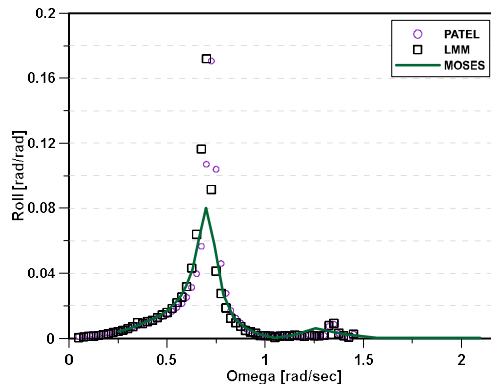


Fig. 3.5 Roll motion response

다음으로 계류삭 해석 기법에 따른 구조물의 거동을 비교하기 위하여 Fig. 3.6과 같이 불규칙 파랑 중에서 계산하였다. 이때 불규칙 파랑은 유의파고 4.22 m, 유의주기 9.15sec를 갖는 JONSWAP 스펙트럼을 사용하여 해석하였다. 먼저 검정색 선으로 표시된 집중질량법(LMM)과 빨간색 선으로 표시된 Patel의 이론식(Patel)의 결과가 정성적으로 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 복원 계수가 상수로 입력된 경우(Const) LMM과 PATEL에 비해 복원되는 속도가 느린 것을 볼 수 있다. 구조물의 변위(Offset)가 커질수록 계류삭의 복원계수 및 길이가 변하여 계류삭으로부터 오는 복원력은 더 크게 작용하지만 복원 계수가 상수로 입력된 경우 이에 대한 영향은 고려하지 못해 이러한 현상이 발생하였다. 趙孝濟(1991)는 현수선 계류시스템을 갖는 반잠수식 해양 구조물의 동적 응답을 해석하기 위해 복원계수를 상수로 입력하여 시뮬레이션 하였으며 그 결과를 실험 결과와 비교하여 검증한 바 있다. 그러나 인장강식 계류 시스템에서 복원계수를 상수로 입력하여 해석하는 경우 시뮬레이션 결과가 부정확 할 수 있어 복원계수가 매 타임스텝마다 변화하는 해석 기법을 사용해야한다.

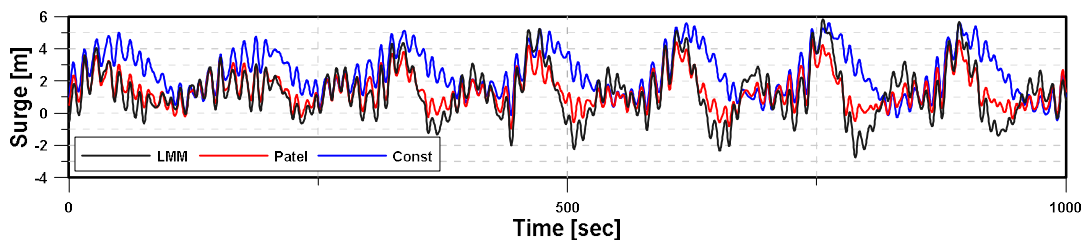


Fig. 3.6 Time history of surge motion

3.4 예인선 알고리즘에 대한 검증

Hook-up 설치 단계에서 구조물의 위치 유지를 위해 예인선을 사용한다. 본 연구에서 적용한 예인선의 알고리즘이 Hook-up 설치 절차에 적절한지 검증하기 위해 MOSES의 해석 결과와 비교하였다. 먼저 Fig. 3.7 ①과 같이 구조물을 위치시키고 양 수평방향으로 예인선을 배치하여 추력을 낼 때 구조물이 Fig. 3.7 ③과 같이 목표한 위치로 회전하는지 확인하였다. 개발된 프로그램(LMM)과 MOSES의 해석 결과는 Fig. 3.8과 같이 나타냈으며, LMM의 경우 구조물이 Fig. 3.7 ③과 같은 목표위치 0° 로 수렴했지만, MOSES의 경우 -18.39° 에 수렴하였다. 앞서 언급한 바와 같이 MOSES의 예인선 알고리즘은 예인선의 최대 용량과 절대좌표계에서의 일정 방향을 입력받아 해석이 진행된다. 즉, MOSES에서 한번 입력된 예인방향은 계산종료시점까지 변하지 않고 같은 각도로 예인된다. 따라서 MOSES의 경우 Fig. 3.7의 ③번 그림과 같은 0° 로 수렴하지 않고 두 예인선이 평형을 이루는 -18.39° 로 수렴한 결과를 나타낸다.

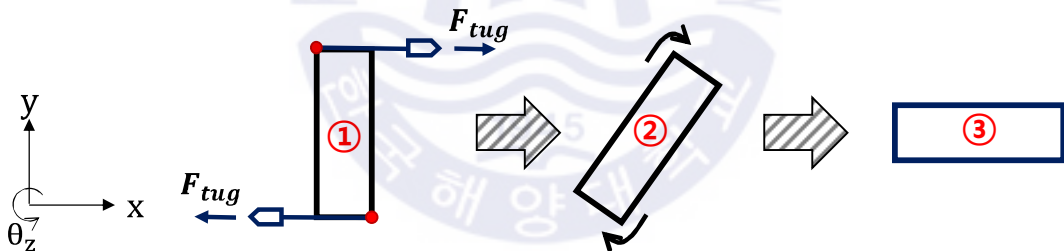


Fig. 3.7 Tug boat validation

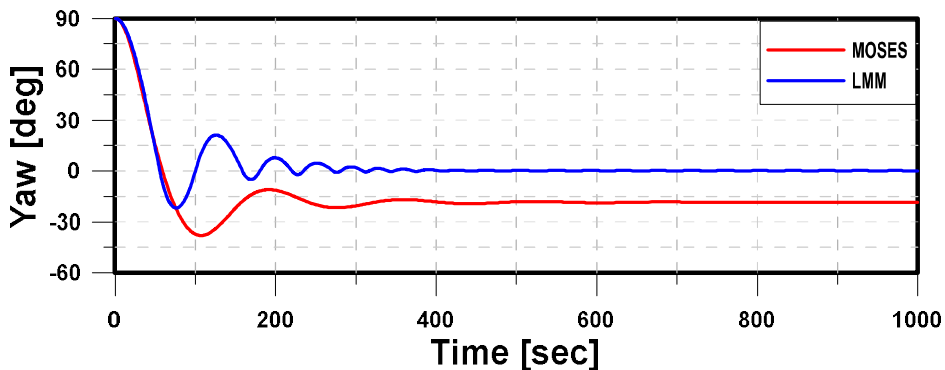


Fig. 3.8 Time history of yaw motion (with tug boat)

제 4 장 Hook-up 시뮬레이션

4.1 Hook-up 설치 개요

Hook-up 설치 작업은 설치 해역에 도착한 구조물과 해저면에 미리 배치된 계류삭을 인양하여 연결하는 것이다. 설치 해역에 도착한 구조물은 다수의 예인선을 이용해 동적 거동을 제어함과 동시에 해양설치 작업선(Anchor Handling Tug Supply vessels, AHTS)을 이용해 Hook-up 설치 작업을 진행한다.

Hook-up 설치 작업을 진행하기 전 작업자는 다음 4가지를 고려해야한다. 첫째, 구조물이 현장에 도착하기 전 모든 앵커와 계류삭은 해저면에 미리 배치되어져야한다. Hook-up 작업과 계류삭을 해저면에 미리 배치하는 작업을 분리하여 수행하는 이유는 계류삭 연결 작업에 소요되는 시간과 비용 및 위험을 줄이기 위함이다.(Intermoor) 둘째, 풍력과 조류력을 고려하여 첫 번째 계류삭을 선택하여 연결한다. 풍력과 조류력이 작용하는 방향의 계류삭을 먼저 설치할 경우 그 지점을 중심으로 구조물은 웨더 베인(Weather vane)을 하기 위함이다. 셋째, 예인선은 Hook-up 작업이 진행되는 동안 구조물의 위치를 유지시키기 위해 항상 사용되어야 한다. 이는 구조물의 안정적인 계류 설치 작업을 위해 진행된다. 마지막으로 구조물과 연결되는 계류삭의 초기장력(Pretension)은 원치를 사용하여 목표한 값을 맞춘다. 이러한 Hook-up 설치 작업의 절차는 외력환경조건, 구조물의 형상, 계류삭의 개수, 계류 방식 등에 따라 다양하게 존재한다.

본 연구에서는 Hook-up 설치 작업 시 일반적으로 진행되는 Hook-up 설치 작업 절차를 예인선 유무에 따라 해석을 진행하고 예인선의 철수 시점을 결정하였다. 구조물의 거동은 계류 설치의 작업 일수를 고려하여 해양환경외력을 적용하였으며 예인선의 철수 시점은 작업자의 안정성을 고려하여 구조물 거동의 유의 값(Significant value)가 6m가 넘지 않도록 하여 결정하였다.

4.1.1 해양설치작업선(Anchor Handling Tug Supply vessel, AHTS)

구조물이 설치해역에 도착하면 AHTS를 이용하여 Fig. 4.1과 같은 과정으로 계류 설치 작업을 진행한다. 현장에 도착한 구조물은 예인선을 이용하여 위치를 유지하고, AHTS에서 ROV(Remotely Operated Vehicle)를 이용해 해저면에 배치된 계류삭의 검사작업을 진행한다. 검사를 끝낸 ROV는 AHTS에서 내린 선과 계류삭을 연결한다. 이후 AHTS는 연결된 계류삭을 회수하여 구조물과 연결시키고, 구조물에서 계류삭을 다시 회수하면 계류삭 하나의 연결 작업이 완료된다.

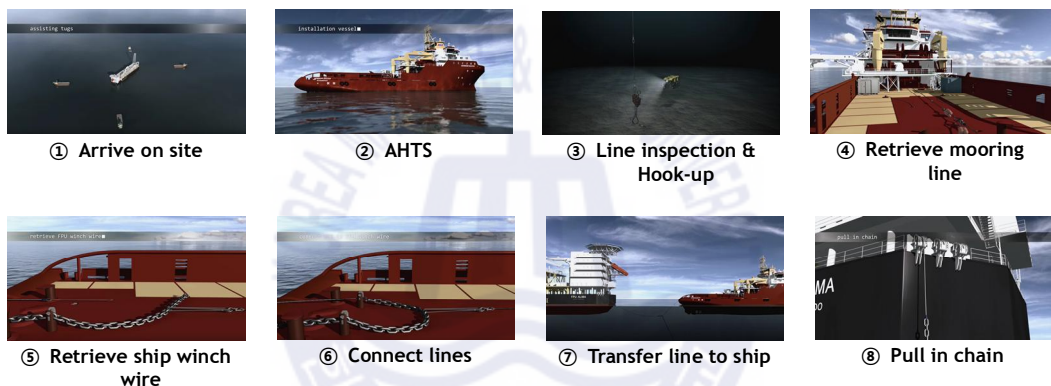


Fig. 4.1 Sequence of AHTS operating

4.1.2 일반적인 Hook-up 절차

일반적으로 Hook-up 설치는 예인선을 이용하여 구조물의 운동을 제어하는 상황에서 Table. 4.1과 같이 진행되고 이때의 해저면에 미래 배치된 계류삭은 Fig. 4.2와 같다. 먼저 설치 해역에 도착한 구조물은 4번 계류삭(#4)과 연결한 후 초기장력의 50%를 유지한다. 이때 하나의 계류삭을 연결하는데 1~2일이 소요된다. 다음으로 5번(#5), 12번(#12), 13번(#13) 계류삭의 순서로 구조물에 연결하여 초기장력의 50%를 유지한 후 연결된 4개의 계류삭이 평형을 이루면 초기장력의 100%로 맞춰준다. 이후 각 번들의 두 번째 계류삭부터는 첫 번째 계류삭과 동일한 방법으로 연결되어 Hook-up 설치과정을 Table 4.2와 같이 반복해서 진행한다.

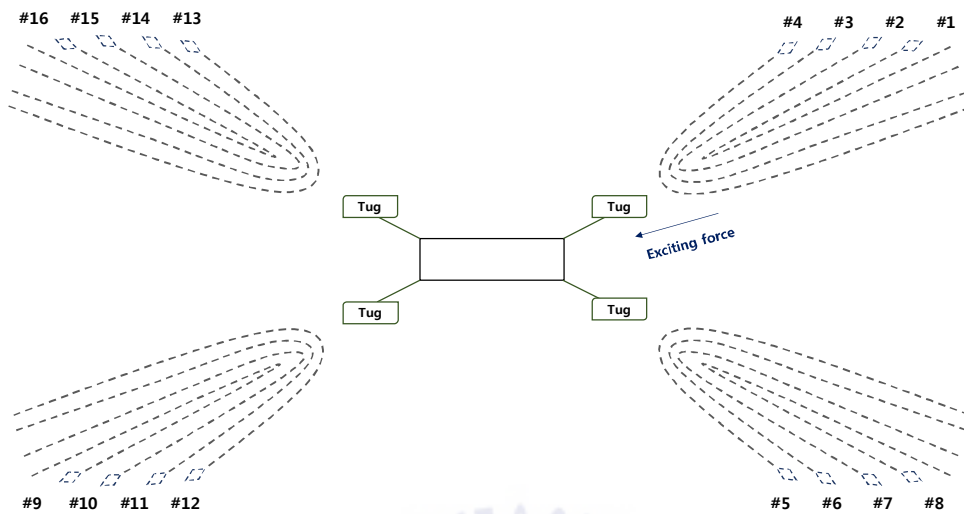


Fig. 4.2 Pre-laid installation before hook-up operation

Table 4.1 Hook-up procedure table

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
#4	■				■															
#5		■														■				
#12			■													■				
#13				■												■				
#3						■														
#6							■													
#11								■												
#14									■											
#2										■										
#7											■									
#10												■								
#15													■							
#1														■						
#8															■					
#9																■				
#16																	■			

Pretension 50%
Pretension 100%

Table 4.2 Hook-up installation procedure

None	T 50%	T 50%	T 50%	T 50%	4T 100%	T 50%	T 50%	T 50%	T 50%	8T 100%	T 50%	T 50%	T 50%	T 50%	12T 100%	T 50%	T 50%	T 50%	T 50%	16T 100%
	#4	#5	#12	#13	%	#3	#6	#11	#14	%	#2	#7	#10	#15	%	#1	#8	#9	#16	%

4.2 외력 환경 조건

DNV-OS-H101(2011)에서는 해양 설치 작업 시 작업 기간에 따라 외력환경을 정의하고 설계에 반영하는 것을 권장하고 있다.(Yoon.et.al, 2018) Hook-up 작업의 경우 16개의 계류삭을 구조물과 연결하는데 대략 한 달 정도의 기간이 소요되며, 이때 외력환경 조건들은 Table 4.3과 같다.

Table 4.3 Environmental condition

Wave			Wind		Current		
H_s	T_s	γ	Heading	V	Heading	V	Heading
[m]	[sec]		[deg]	[m/s]	[deg]	[m/s]	[deg]
4.22	9.15	3.3	0	10	30	1.37	45
JONSWAP							

4.3 Hook-up 시뮬레이션 without Tug boats

Table 4.3에서 언급한 복합 외력환경을 적용하기에 앞서 각각의 외력으로 인한 구조물의 거동을 분석하기 위해 Table 4.4와 같은 해석조건을 두고 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 Hook-up 설치 작업의 진행절차는 Table 4.2와 같고 4개의 계류삭이 연결된 단계(#13)부터 해석을 진행하였다. 그리고 파력으로 인한 구조물의 불규칙한 거동은 유의 값을 사용하여 나타냈다.

Table 4.4 Load case without tug boat

	Number of tug	Exciting force
Case 1		Wave($F_{wave}^{(1)} + F_{wave}^{(2)}$)
Case 2	0 EA	Current($F_{current}$)
Case 3		Wind(F_{wind})

4.3.1 Case 1) Exciting force : Wave

파력만이 작용할 때 Hook-up 설치 과정 중 구조물의 x 방향 거동은 Fig. 4.3

와 같으며 작업 순서는 Table 4.2와 같이 진행된다. 설치 과정 중 구조물의 거동을 살펴보면 4개의 계류삭이 초기장력의 50%로 맞춰진 단계(#13)에서 구조물은 큰 거동을 갖고 초기장력의 100%가 되었을 때(4T 100%) 급격히 줄어든다. 이후 8개의 계류삭이 연결되어 초기장력의 100%로 맞춰진 단계(8T 100%)에서 구조물은 다시 큰 거동을 갖는다. Fig. 4.4는 8개 계류삭의 장력이 초기장력의 100%로 맞춰질 때 구조물의 x 방향 운동과 2차 파랑 강제력의 시계열 데이터를 주파수 분석하여 나타낸 그래프이다. 여기서 두 주기가 거의 일치하는 것을 볼 수 있고 그 결과 큰 진폭의 x 방향 운동이 발생했다.

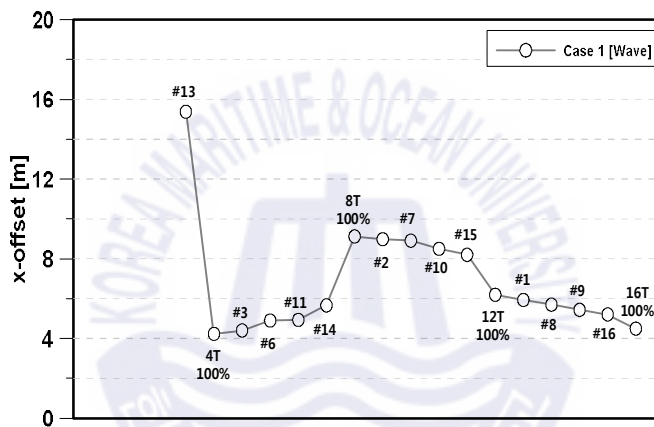


Fig. 4.3 x -offset of barge during hook-up operation

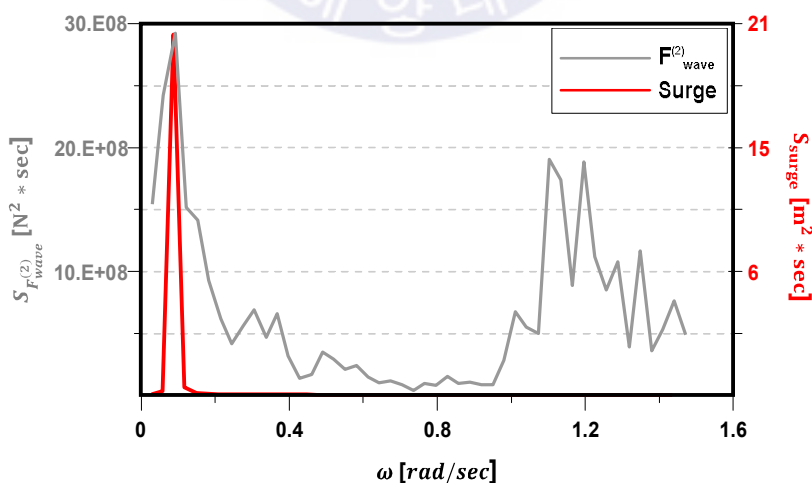


Fig. 4.4 Second order wave force spectrum with surge

Fig. 4.5와 Fig. 4.6은 각각 y 방향과 xy 평면상에서의 회전운동 θ_z 에 대한 구조물의 운동을 나타낸 그래프이며 파력이 선수방향으로 작용하여 계류라인이 비대칭적으로 설치된 경우에만 거동이 발생하였다. 여기서 Fig. 4.6의 9번째 계류삭이 연결되는 단계에서(#2) θ_z 의 회전운동이 가장 크게 발생했다. 이에 대한 원인을 분석하고자 3번(#3), 2번(#2), 1번(#1) 계류삭이 연결될 때의 시계열 데이터를 Fig. 4.7과 같이 나타냈다. 이는 각각 5번째, 9번째, 13번째 계류삭이 설치되는 과정으로, 계류삭의 장력이 평형을 이루는 단계에서 하나씩 더 연결된 단계이다. Fig. 4.7의 검은색으로 표시된 2번 계류삭이 연결되는 단계는 나머지 경우에 비해 큰 운동의 폭을 가진다. 이는 Fig. 4.4에서 언급한 바와 같이 x 방향의 저주파수 운동이 발생하여 회전운동에 영향을 미친 것이라 판단된다.

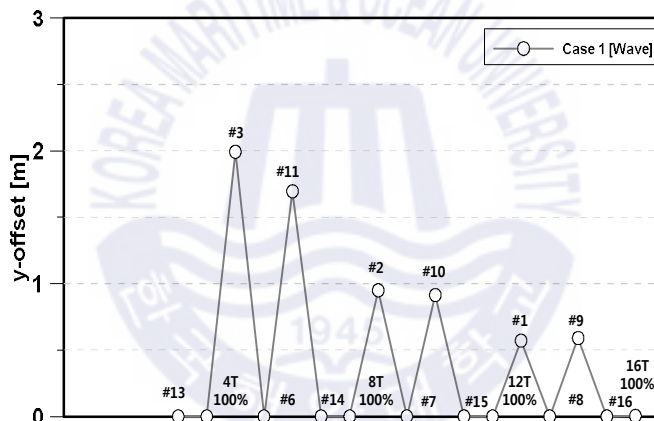


Fig. 4.5 y -offset of barge during hook-up operation

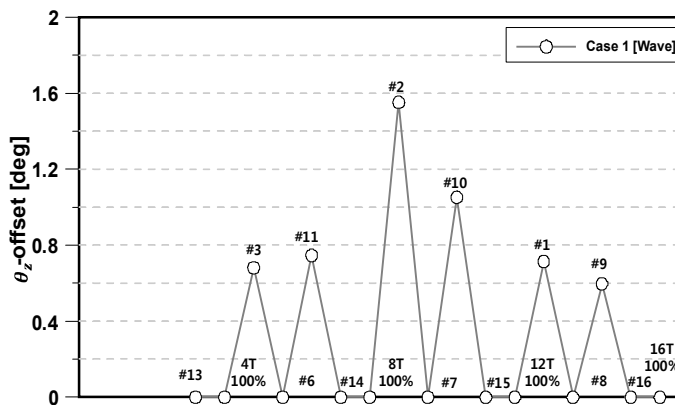


Fig. 4.6 θ_z -offset of barge during hook-up operation

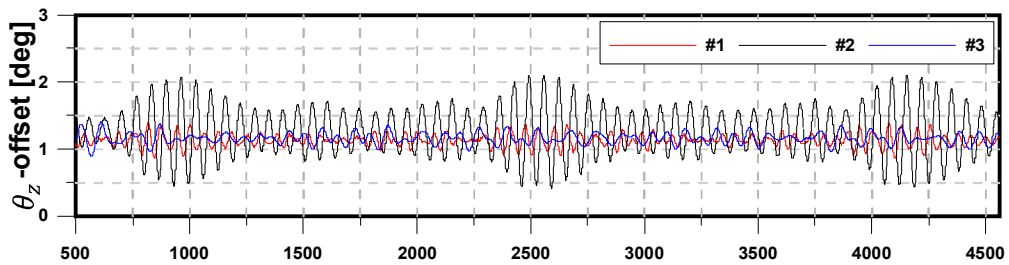


Fig. 4.7 Time history of θ_z -offset

4.3.2 Case 2) Exciting force : Current

Fig. 4.8 ~ Fig. 4.10는 조류력으로 인한 각각 구조물의 x , y , θ_z 방향 거동을 나타낸 그래프이다. 각각의 그래프는 일정한 힘으로 작용하는 조류력으로 인해 구조물의 거동이 수렴하는 값을 나타낸다. 먼저 x 방향 운동을 보면 4번째 계류선이 연결되는 단계(#13)에서 가장 큰 운동이 발생했다. 이는 조류로 인한 하중이 상대적으로 크게 작용하여 계류선의 초기장력으로 구조물의 거동을 제어하지 못하고 발생한 현상이다. 이때 구조물의 y 방향 거동은 변화가 거의 없었으며 회전운동인 θ_z 에서 다소 큰 회전 운동이 발생한 것을 볼 수 있다. 초기 4개의 계류선이 연결된 단계(#13) 이후로 계류선이 하나씩 연결 될 때 마다 비대칭적으로 연결되는 경우를 제외하고 각 방향의 구조물의 거동이 감소하는 경향을 볼 수 있다.

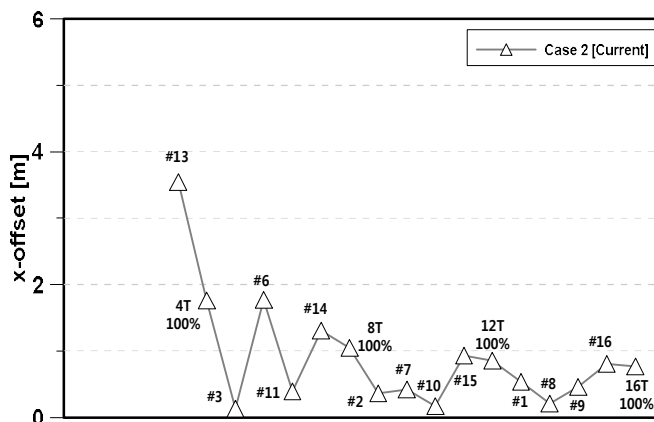


Fig. 4.8 x -offset of barge during hook-up operation

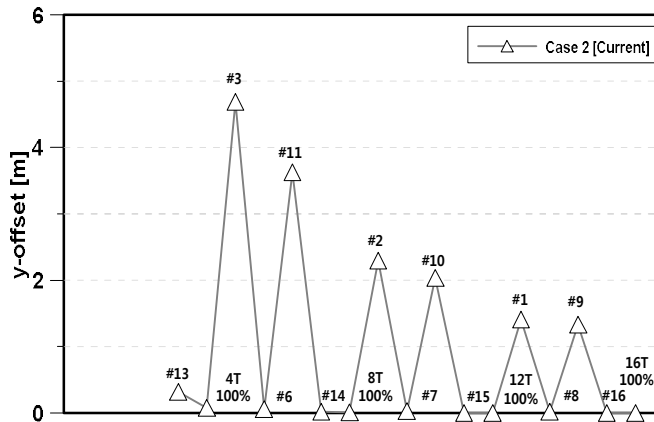


Fig. 4.9 y -offset of barge during hook-up operation

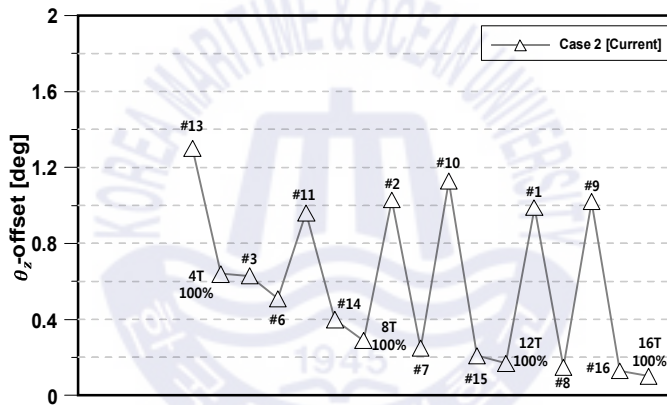


Fig. 4.10 θ_z -offset of barge during hook-up operation

4.3.3 Case 3) Exciting force : Wind

마지막으로 Fig. 4.11 ~ Fig. 4.13은 각각 풍력으로 인한 구조물의 x , y , θ_z 방향 거동을 나타낸 그래프이다. Case 2에서의 결과와 다르게 4개의 계류삭이 초기장력의 50%로 연결된 단계(#13)에서 구조물의 거동에 대한 변화가 거의 없었다. 이는 계류삭 4개의 초기장력만으로 풍력으로 인한 구조물의 거동을 제어할 수 있다는 것을 의미한다. 이후 Case 2와 같이 계류삭이 하나씩 연결될 때 마서 구조물의 운동이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

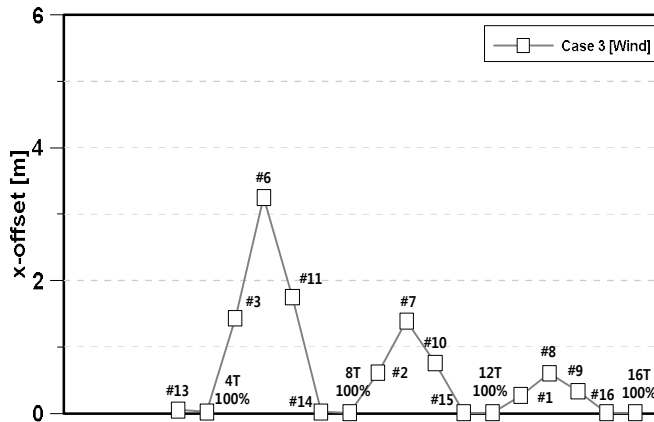


Fig. 4.11 x -offset of barge during hook-up operation

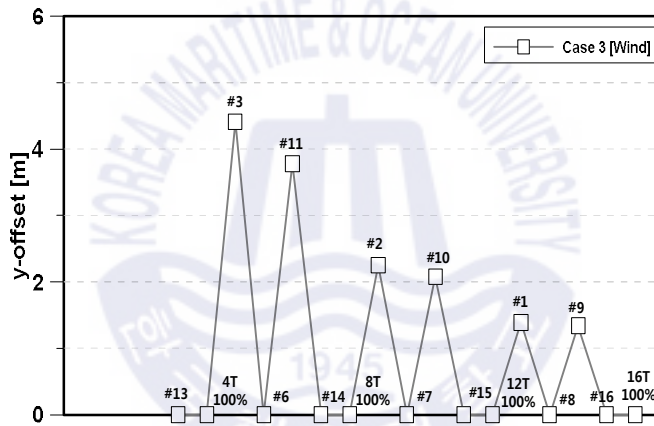


Fig. 4.12 y -offset of barge during hook-up operation

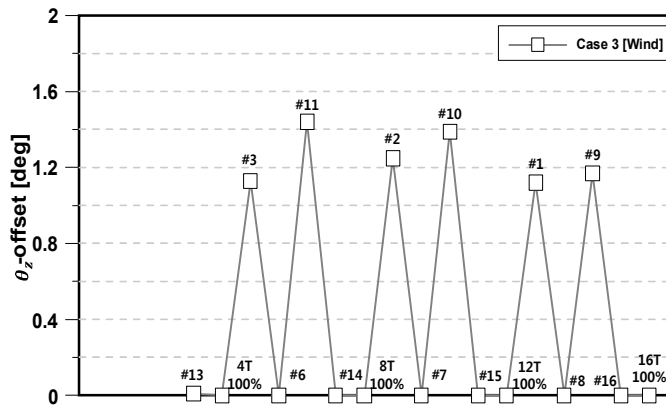


Fig. 4.13 θ_z -offset of barge during hook-up operation

4.4 Hook-up 시뮬레이션 with Tug boats

Hook-up 설치작업 중 구조물의 위치제어를 위해 사용되는 예인선에 대한 제원은 Table 4.5에 나타난 바와 같으며, 예인선의 배치는 Fig. 4.14와 같다. 예인선이 4대 배치된 경우 Hook-up의 모든 절차에 대해 해석을 진행하였고, 예인선이 2대 배치된 경우와 예인선이 없는 경우에 대해서는 계류삭 4개가 연결되어 초기장력 100%로 맞춰진 단계(4T 100%)부터 해석을 진행하였다. 구조물에 작용하는 외력환경은 Table 4.3에서 언급한 바람, 파도, 조류의 하중을 적용하고, 초기장력이 맞춰지는 상황(Transient)에 대해서는 고려하지 않았다.

Table 4.5 Main dimension of tug boat

Description	Magnitude
Tug maximum power [ton]	100
Tug line length [m]	100
Line elasticity [MN]	200



Fig. 4.14 Tug boats layout

Fig. 4.15는 예인선의 추력만으로 계류삭이 연결되지 않은 구조물의 위치를 유지하는 단계에서의 x 방향 거동을 나타낸 그래프이다. 즉, 예인선 4대를 이용해 설치 해역에 도착한 구조물의 동적 거동을 제어하면서 Hook-up 설치 작업을 기다리는 단계이다. 이 단계에서 구조물은 2250초가 지난 시점에서 x 방향으로 큰 거동을 나타낸다. Fig. 4.16의 그래프는 2차 파랑 강제력의 시간이력을 나타내며 구조물의 큰 거동이 발생하기 전 300ton이 넘는 외력이 작용하는 것을 볼 수 있다. Table 4.4와 같이 예인선 한 대의 최대 추력은 100ton, 한 방향

으로 낼 수 있는 예인선들의 합 추력의 상한선은 200ton이다. 즉, 예인선들의 합 추력의 한계로 2차 파랑 강제력으로 인한 구조물의 거동을 제어하지 못하여 큰 운동이 발생하였다.

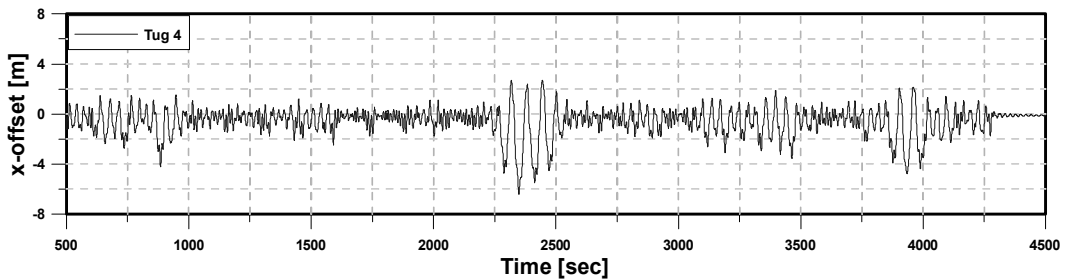


Fig. 4.15 Time history of x -offset with tug 4 (None)

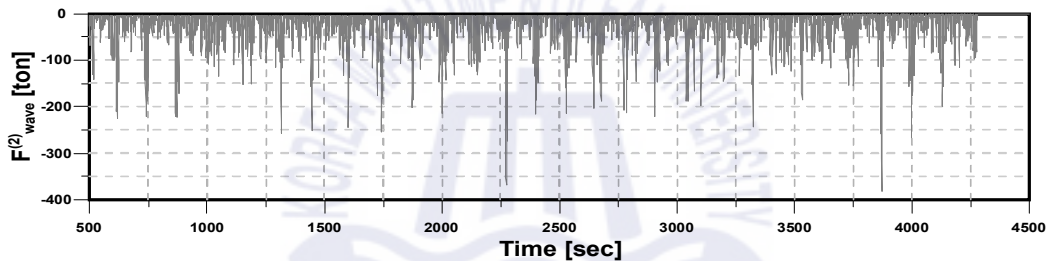


Fig. 4.16 Time history of second order wave force($F_{wave}^{(2)}$)

그리고 같은 상황인 단계(None)에서의 구조물 y 방향과 θ_z 방향 거동은 각각 Fig. 4.17과 Fig. 4.18에 나타났다. y 방향과 θ_z 방향을 서로 다른 방향에서 구조물에 작용하는 조류력과 풍력으로 인하여 발생하며 4대의 예인선 추력만으로 구조물의 위치를 잘 유지하고 있는 것을 볼 수 있다.

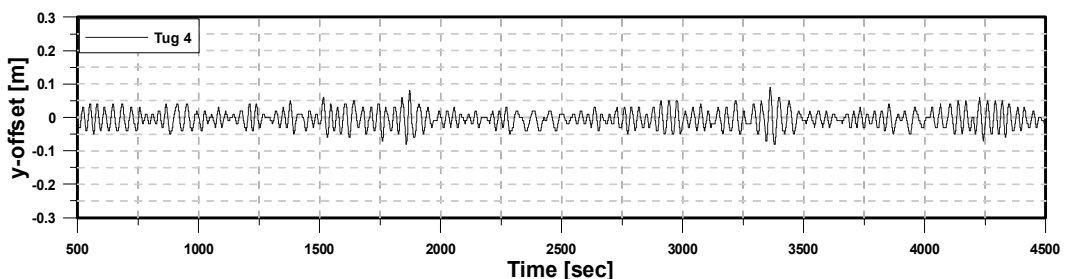


Fig. 4.17 Time history of y -offset with tug 4 (None)

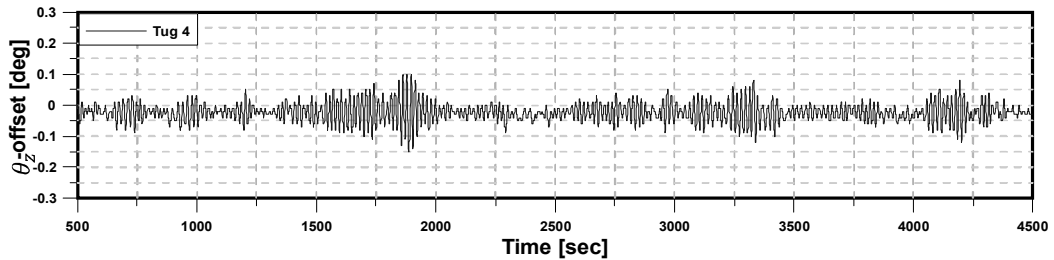


Fig. 4.18 Time history of θ_z -offset with tug 4 (None)

다음으로 계류삭이 1개 연결된 단계(#4)부터 4개가 연결되는 단계(#13)까지의 구조물 x , y , θ_z 방향 거동에 대해 Fig. 4.19 ~ Fig. 4.21와 같이 나타내었다. 그 래프는 2차 파랑 강제력의 영향이 가장 큰 2000초 ~ 3000초 사이의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 먼저 x 방향 거동 그래프를 보면, 첫 번째 계류삭이 연결되는 단계(#4)와 두 번째 계류삭이 연결되는 단계(#5)에서 계류삭 장력으로 인해 계류삭이 연결되지 않은 단계(None)에서 발생한 2차 파랑 강제력의 영향이 감소한 것을 확인할 수 있다. 세 번째 계류삭이 연결된 단계(#12)에서 x 방향 거동은 증가하만, 정상 표류력(Steady drift force)의 영향이 감소한 것을 확인할 수 있다. 그리고 4번째 계류삭이 연결된 단계(#13)를 보면 예인선의 추력과 계류삭의 장력에 의해 전체적으로 구조물 거동의 크기가 줄어든 것을 확인할 수 있다. y 방향 그래프의 경우 첫 번째 계류삭이 연결되는 단계(#4)와 세 번째 계류삭이 연결되는 단계(#12)의 단계에서 구조물이 원점으로부터 조금씩 이동한 상태에서 움직이는 것을 볼 수 있다. 이는 계류삭이 x 축을 기준으로 비대칭적으로 연결되어 y 축 방향의 힘이 서로 평형을 이루기 위하여 한쪽방향으로 밀려나 발생한 현상이다. 첫 번째 계류선이 연결된 단계(#4)에 비해 계류삭이 더 많이 연결된 단계 즉, 세 번째 계류삭이 연결된 단계(#12)에서 밀려난 정도가 작은 것을 볼 수 있다. θ_z 방향 그래프의 경우 계류삭이 x 축 기준 대칭적으로 연결된 경우(#5, #13)에서 비대칭적으로 연결된 경우(#4, #12)보다 작은 움직임을 보이는 경향이 있지만, y 방향 그래프와 같이 한쪽으로 밀려나 움직이는 현상은 나타나지 않았다.

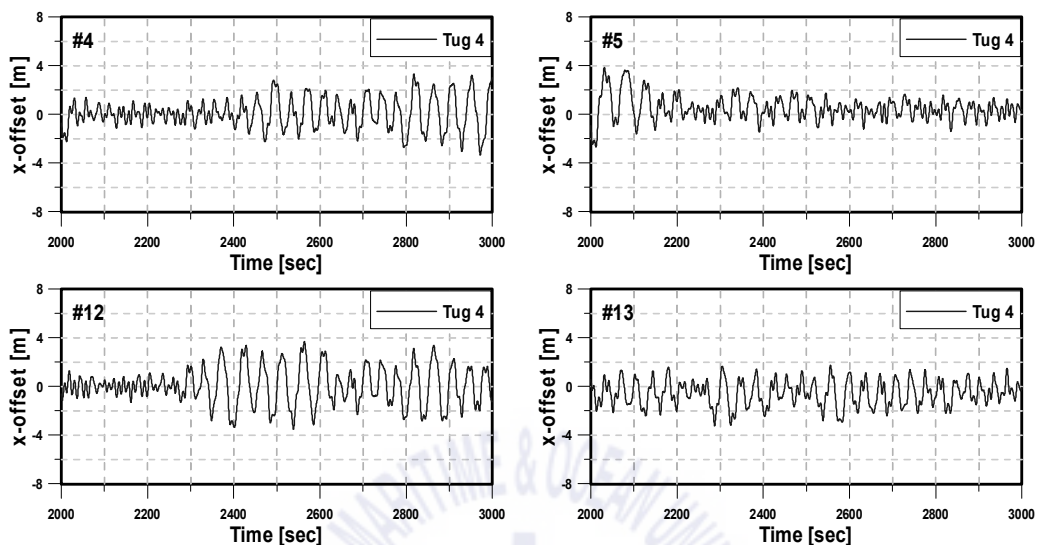


Fig. 4.19 Time history of x -offset with tug 4 (#4→#13)

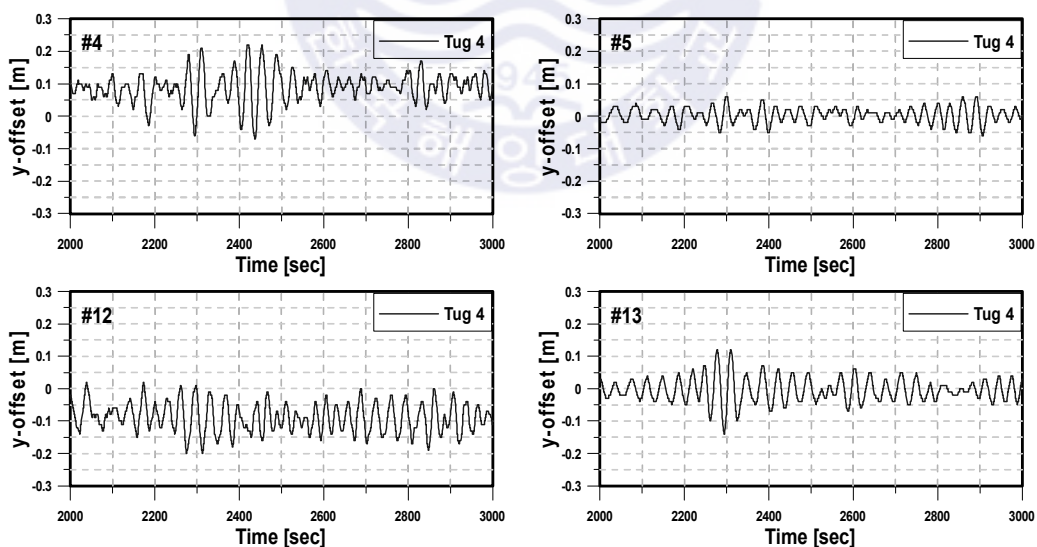


Fig. 4.20 Time history of y -offset with tug 4 (#4→#13)

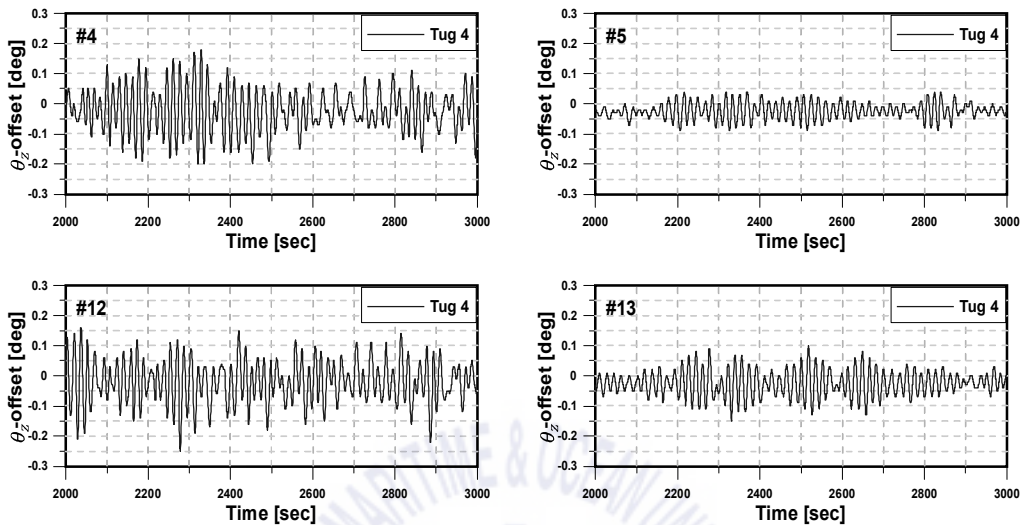


Fig. 4.21 Time history of θ_z -offset with tug 4 (#4→#13)

Fig. 4.22 ~ Fig. 4.24는 계류삭 4개가 초기장력 100%로 연결된 단계(4T 100%)에서 구조물의 x , y , θ_z 방향 거동을 나타내며, 각각 예인선이 4대, 2대 그리고 예인선과의 연결 없이 계류삭의 장력만으로 구조물의 거동을 제어하는 것을 비교하여 나타낸 그래프이다. 먼저 x 방향 거동의 시계열을 분석하면 4대의 예인선을 이용하여 위치 유지를 하는 경우보다 예인선이 2대일 때 거동이 크게 발생하였다. 그리고 예인선이 연결되지 않은 경우 정상 표류력으로 인해 원점으로부터 떨어진 위치에서 큰 운동이 발생하였다. y 방향과 θ_z 방향 거동의 경우 2대의 예인선을 이용하여 위치를 유지할 때 불안정하게 운동하고 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 예인선과 연결되지 않은 구조물의 거동은 원점에서부터 벗어난 지점에 수렴하고, 예인선 4대를 이용할 경우 원점으로 돌아오는 것을 확인할 수 있다. 즉, 계류삭 4개가 초기장력 100%로 연결된 단계(4T 100%)에서 예인선 2대를 이용할 경우 x 방향의 거동은 제어가 가능하지만 y 방향과 θ_z 방향의 거동은 불안정하게 나타난다.

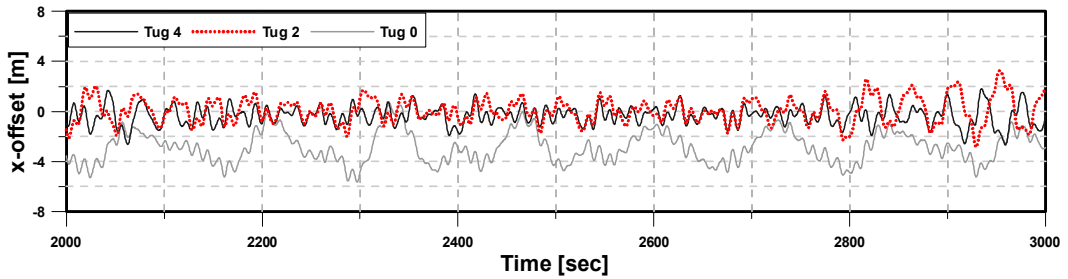


Fig. 4.22 Time history of x -offset (4T 100%)

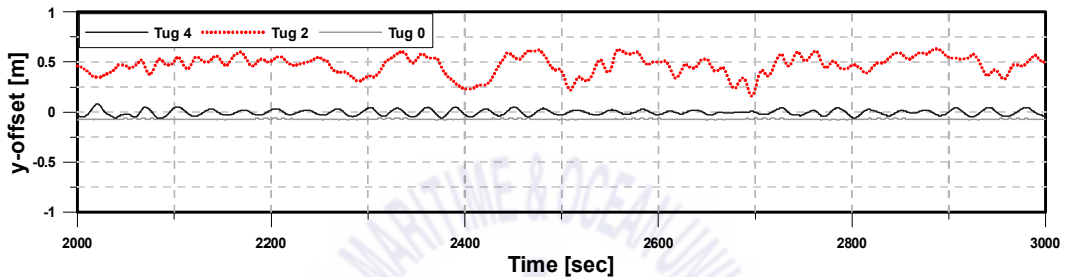


Fig. 4.23 Time history of y -offset (4T 100%)

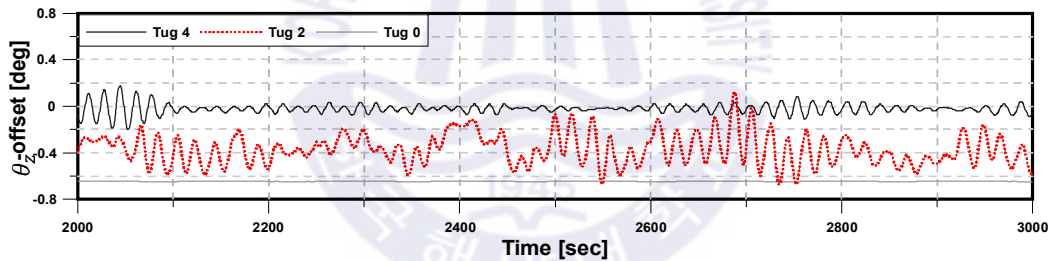


Fig. 4.24 Time history of θ_z -offset (4T 100%)

이후 계류삭 5개가 연결되는 단계(#3)부터 8개가 연결되는 단계(#14)까지의 구조물의 x , y , θ_z 방향 거동은 Fig. 4.25 ~ Fig. 4.27에 나타났다. 먼저 구조물의 x 방향 거동에서 계류삭이 6개 연결되는 단계(#6)부터 예인선이 2대 배치된 경우와 4대 배치된 경우 큰 차이 없이 구조물의 운동을 제어하였다. 또한 구조물 y 방향 거동의 경우 예인선 2대만으로 충분히 안정적으로 제어할 수 있었으며, θ_z 방향 또한 불안정한 거동이 많이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 즉, 계류삭이 6개 연결되는 단계(#6)에서부터 예인선 2대만으로 구조물의 위치유지가 가능하다.

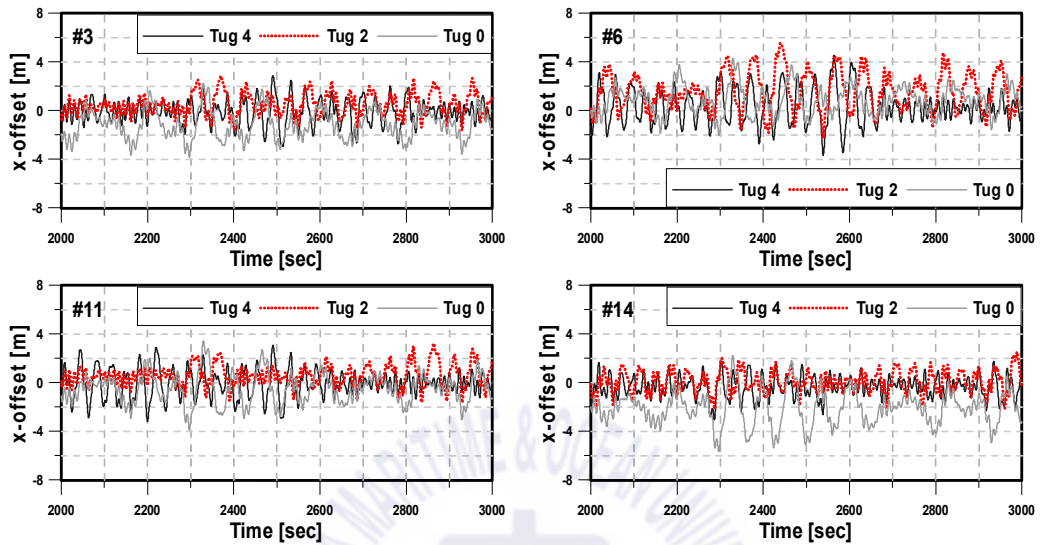


Fig. 4.25 Time history of x -offset (#3→#14)

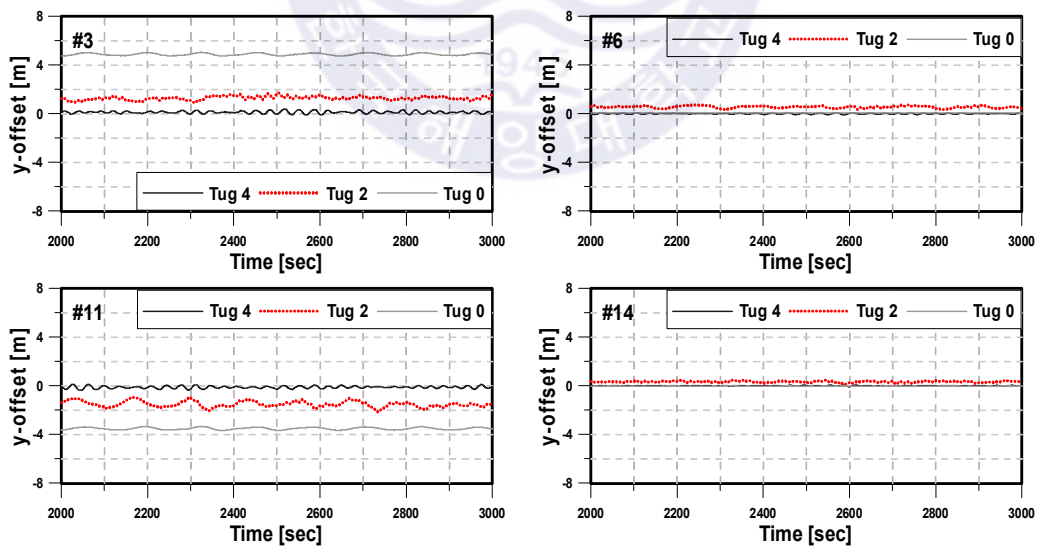


Fig. 4.26 Time history of y -offset (#3→#14)

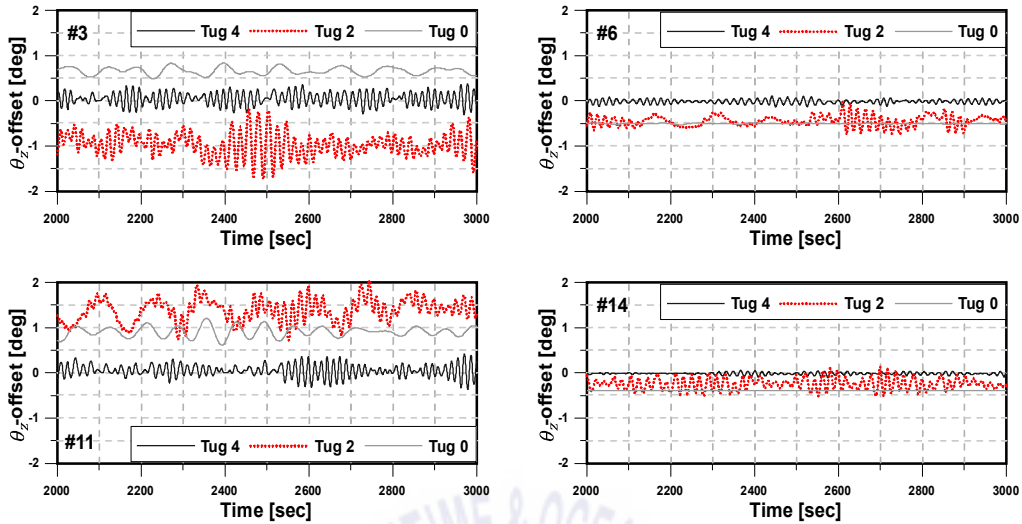


Fig. 4.27 Time history of θ_z -offset (#3→#14)

Fig. 4.28 ~ Fig. 4.30은 계류삭 8개가 초기장력 100%로 연결된 단계(8T 100%)에서 구조물의 x , y , θ_z 방향 거동을 나타낸다. Fig. 4.28의 구조물의 x 방향 거동을 보면 예인선과의 연결 없이 계류삭의 장력만으로 구조물의 운동을 제어할 때 Fig. 4.22에 나타난 단계(4T 100%)보다 큰 진폭으로 운동하는 것을 확인할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 Fig. 4.4는 8개 계류삭의 장력이 초기장력의 100%로 맞춰질 때 구조물의 Surge 운동과 2차 파랑 강제력의 시계열 데이터를 주파수 분석하여 나타난 그래프이다. 여기서 두 주기가 거의 일치하는 것을 볼 수 있고 그 결과 큰 진폭의 Surge 운동이 발생했다. Fig. 4.28에서 볼 수 있듯이 4대의 예인선을 이용할 경우 구조물의 거동은 크게 줄어들며, 2대의 예인선만으로도 4대의 경우와 큰 차이 없이 운동하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 4.29와 같이 구조물은 2대의 예인선을 이용할 때 다른 경우에 비해 y 방향 진폭이 크게 나타나며, Fig. 4.30에서 나타난 θ_z 방향 거동의 경우 비교적 안정적으로 나타났다. 대부분의 Hook-up 설치작업에서 예인선은 전체 계류삭의 절반이 연결되었을 때 철수한다. 그러나 본 연구에서 8개의 계류삭이 초기장력 100%로 연결되었을 때, 예인선 없이 Hook-up 설치작업을 진행하면 구조물은 저주파수 운동이 발생해 위험한 상황을 초래할 수 있다.

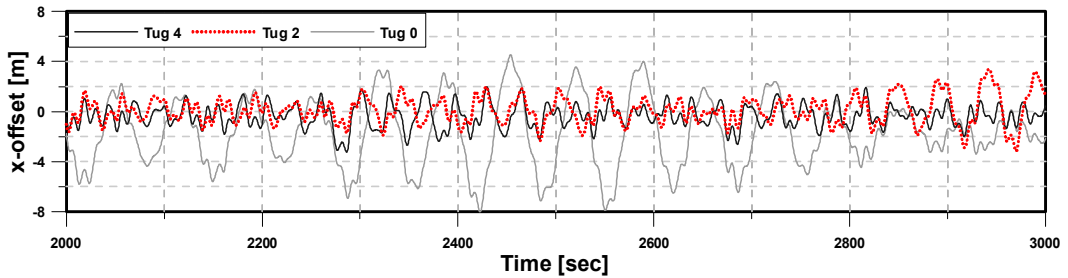


Fig. 4.28 Time history of x -offset (8T 100%)

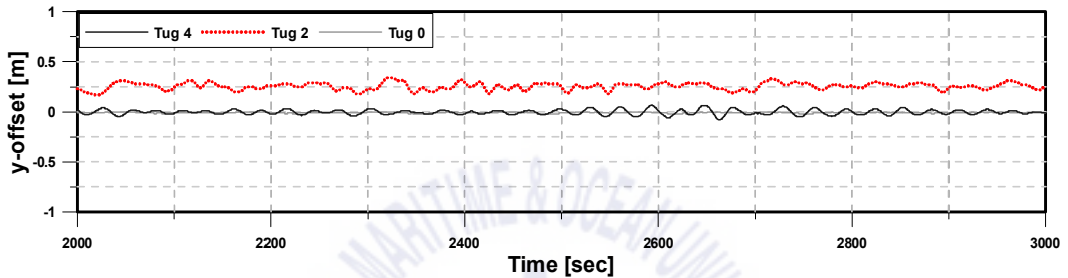


Fig. 4.29 Time history of y -offset (8T 100%)

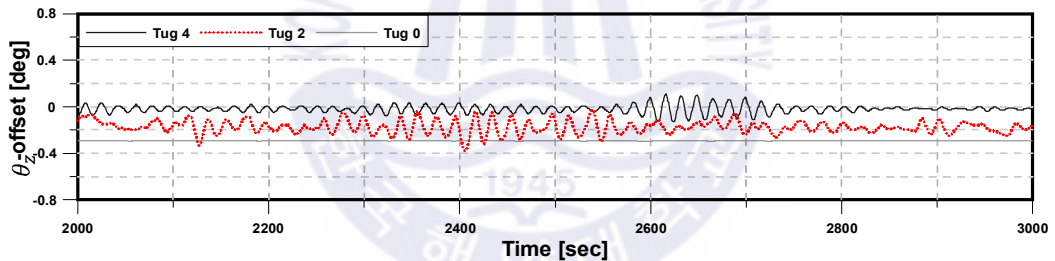


Fig. 4.30 Time history of θ_z -offset (8T 100%)

이후 계류삭이 9개 연결되는 시점부터 12개 연결될 때까지의 구조물 x , y , θ_z 방향 거동은 Fig. 3.31 ~ Fig. 3.33과 같이 나타났다. x 방향 거동에서 예인선 2대를 이용하여 위치유지를 할 때 4대를 이용하는 것 보다 큰 진폭을 가지지만 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 예인선이 연결되지 않은 경우 구조물 운동 진폭의 크기는 점점 줄어드는 경향을 보이고 있으며, 정상 표류력에 의한 영향이 줄어들어 구조물이 원점으로부터 벗어나는 정도 또한 크게 줄었다. 또한 구조물의 y 방향과 θ_z 방향의 거동은 예인선 2대만으로 구조물은 안정적으로 움직이는 것을 관측할 수 있다.

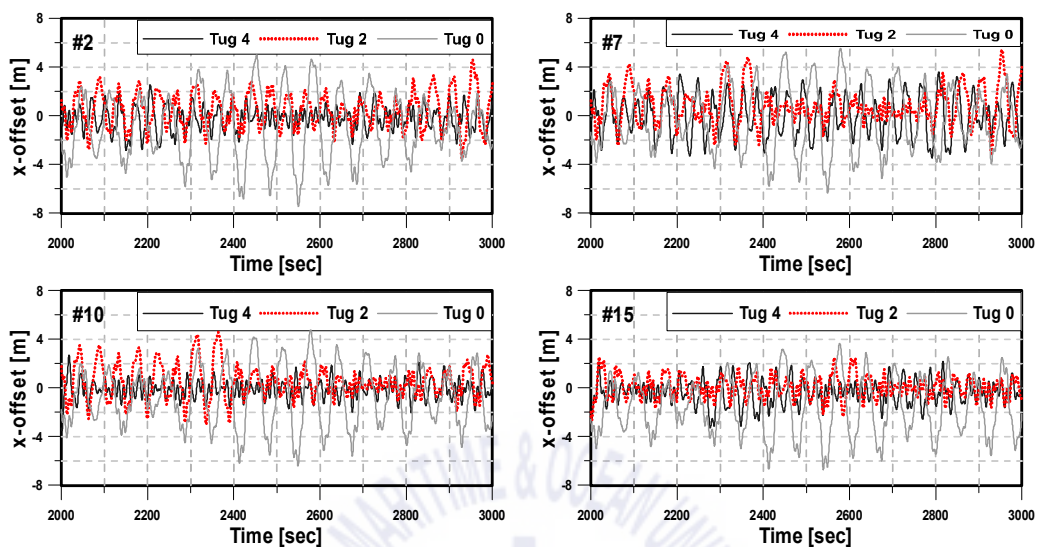


Fig. 4.31 Time history of x -offset (#2→#15)

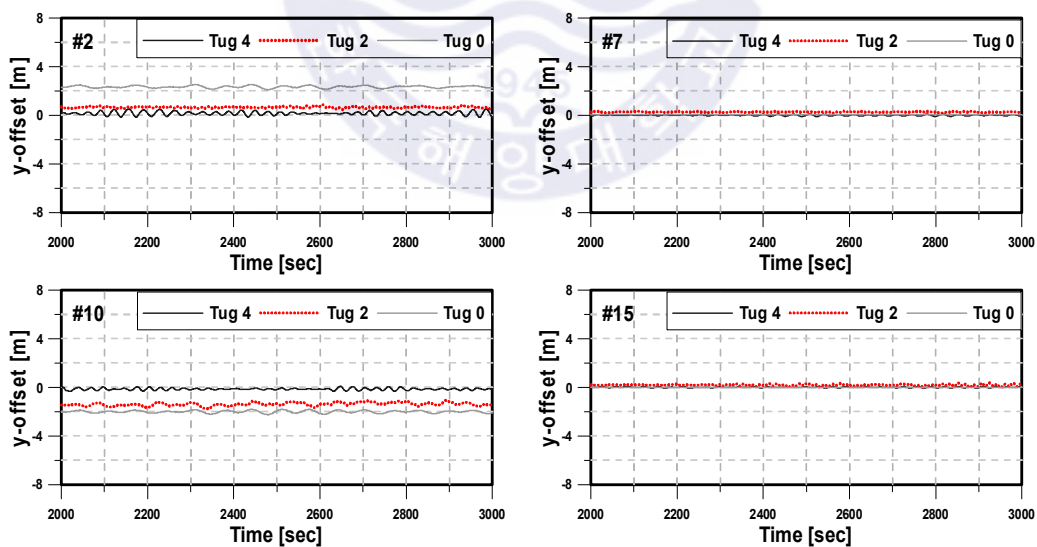


Fig. 4.32 Time history of y -offset (#2→#15)

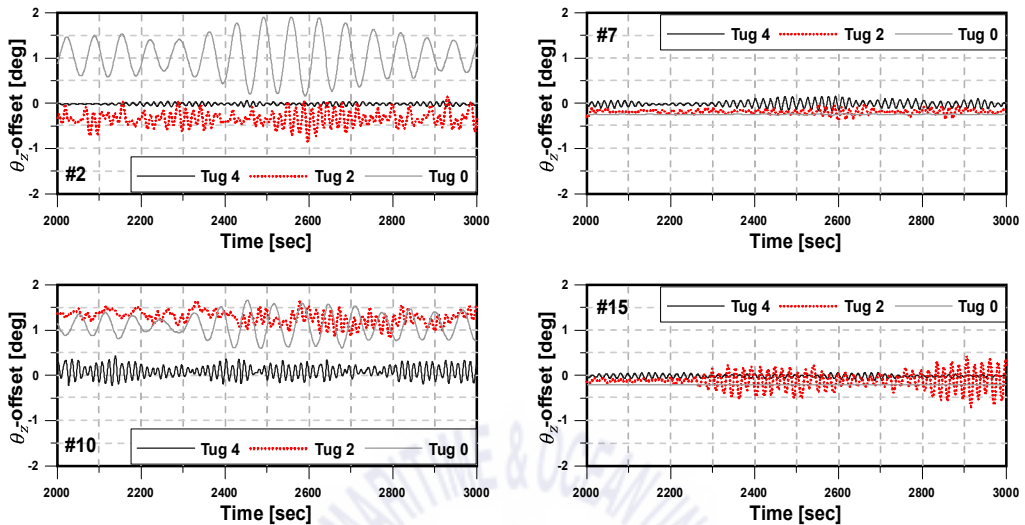


Fig. 4.33 Time history of θ_z -offset (#2→#15)

Fig. 4.34 ~ Fig. 4.36은 계류삭 12개가 초기장력 100%로 구조물에 연결된 단계(12T 100%)에서 구조물의 x , y , θ_z 방향 거동을 나타내며, 예인선이 4대인 경우와 2대인 경우 구조물의 거동에는 큰 차이가 없었다. 예인선과의 연결 없이 계류삭의 장력으로만 위치 유지를 하는 경우 y 방향과 θ_z 방향의 운동은 미소하였고, x 방향의 경우 8개의 계류삭을 연결한 단계(8T 100%)에 비하여 거동이 크게 감소하였다. 이후 16개의 계류선이 연결되는 과정은 Fig. 4.37 ~ Fig. 4.39와 같다.

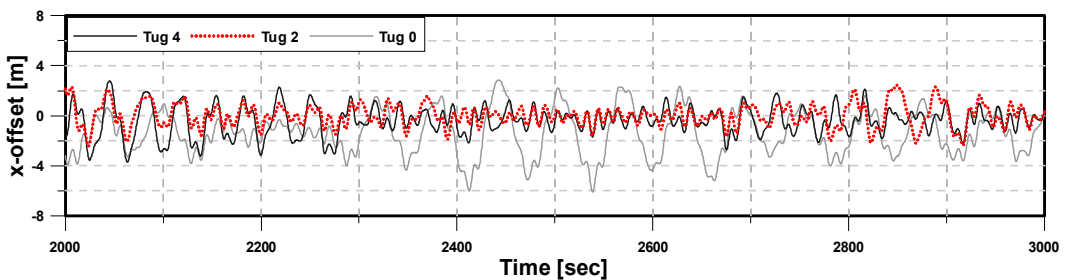


Fig. 4.34 Time history of x -offset (12T 100%)

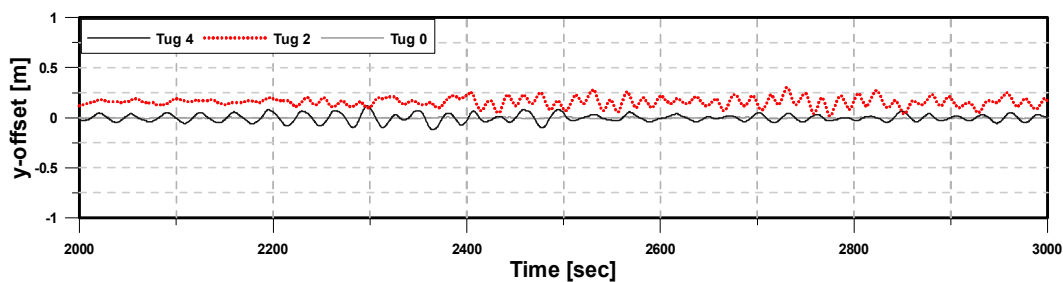


Fig. 4.35 Time history of y -offset (12T 100%)

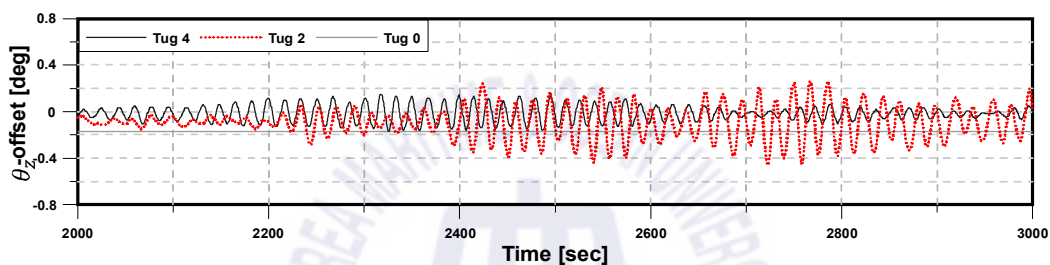


Fig. 4.36 Time history of θ_z -offset (12T 100%)

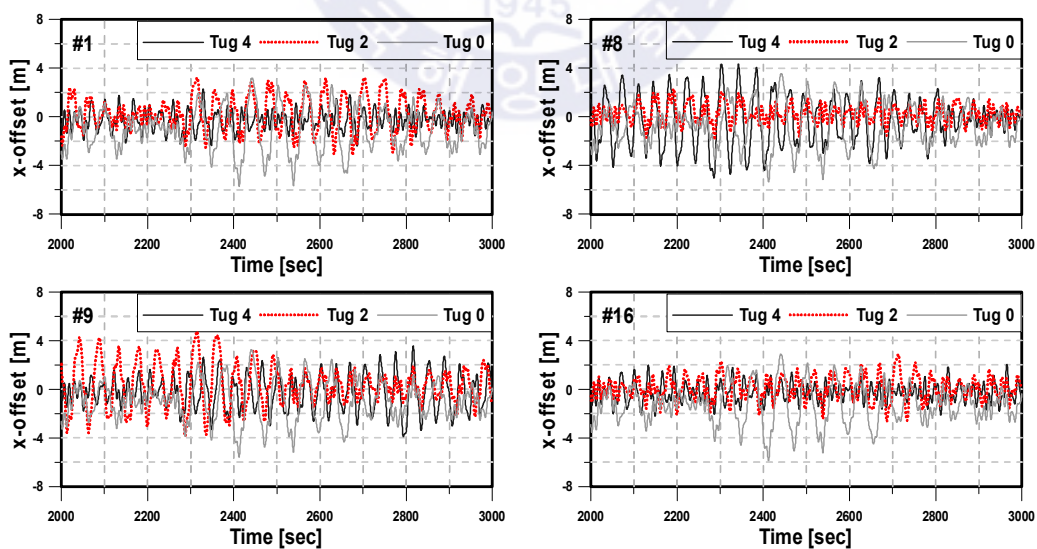


Fig. 4.37 Time history of x -offset (#1→#16)

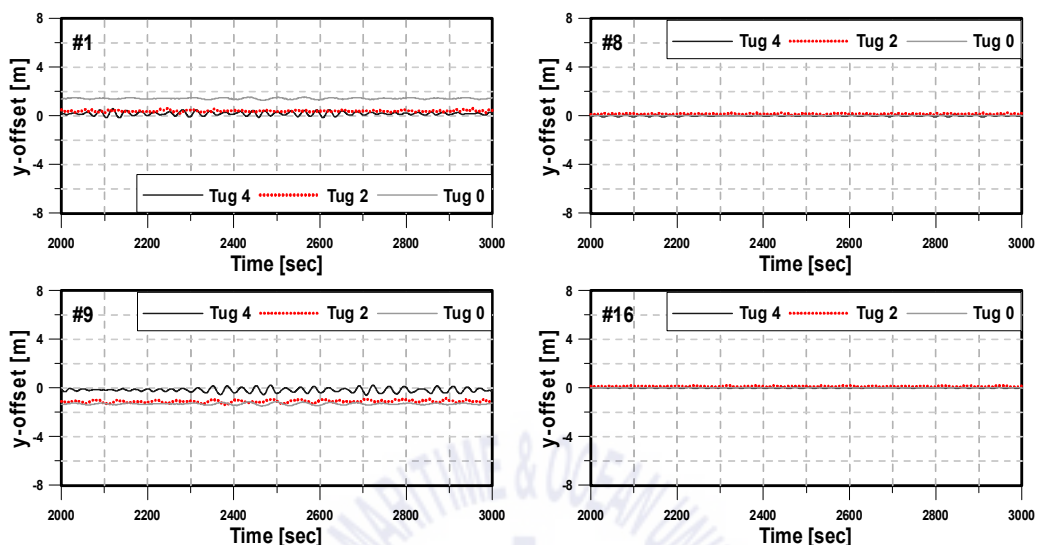


Fig. 4.38 Time history of y -offset (#1→#16)

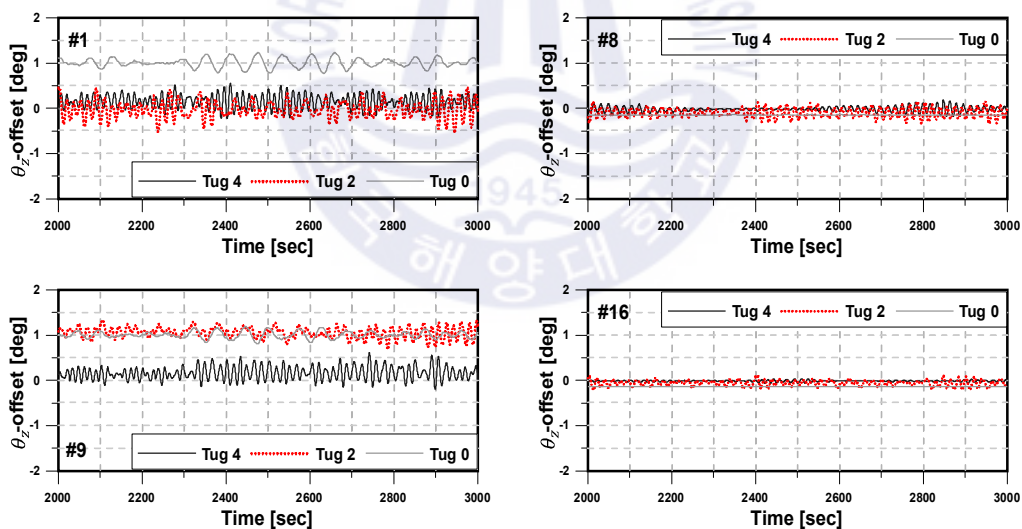


Fig. 4.39 Time history of θ_z -offset (#1→#16)

Fig. 4.40 ~ Fig. 4.42는 계류삭 16개가 초기장력의 100%로 연결된 단계(16T 100%)의 x , y , θ_z 방향 거동을 나타낸다. 전체 계류삭이 구조물에 연결되었을 때 Fig. 4.40과 같이 x 방향 거동은 연결된 예인선 없이도 안정적으로 운동하는 것

을 볼 수 있다. 또한 y 방향, θ_z 방향에서도 구조물의 운동은 연결된 예인선 없이 미소한 값을 유지한다.

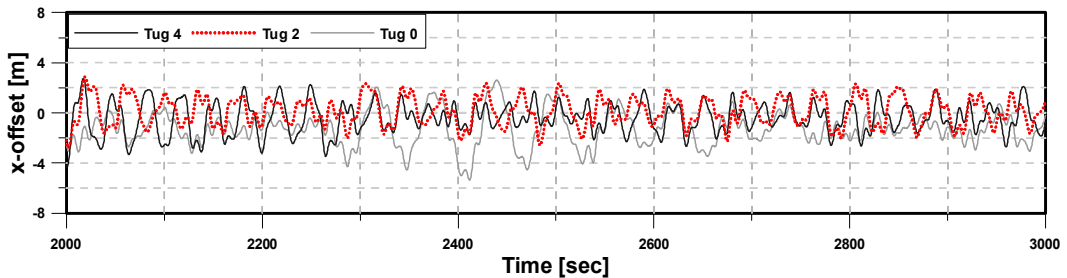


Fig. 4.40 Time history of x -offset (16T 100%)

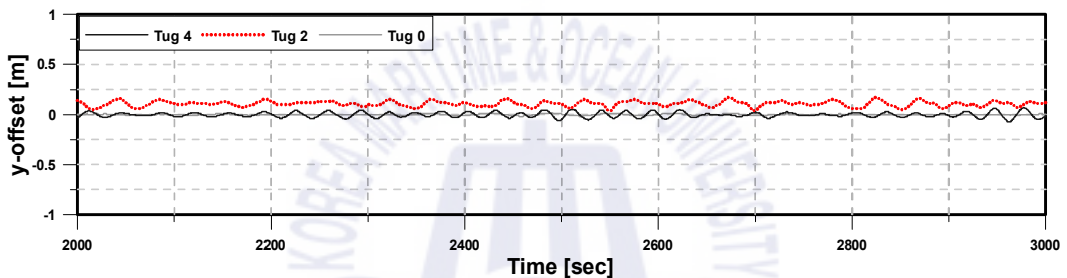


Fig. 4.41 Time history of y -offset (16T 100%)

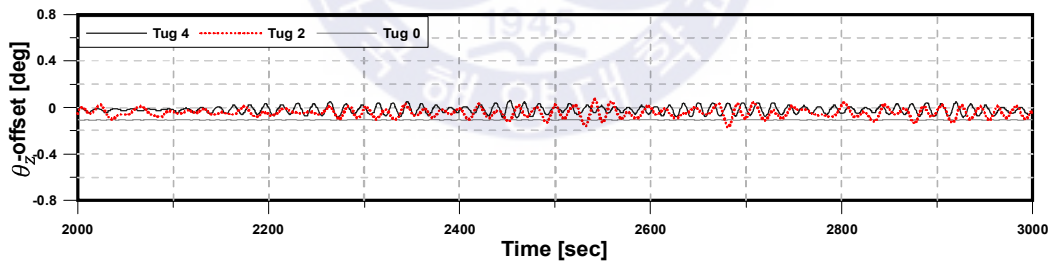


Fig. 4.42 Time history of θ_z -offset (16T 100%)

4.5 해석 결과

Hook-up 설치 작업의 단계별 시뮬레이션 해석 결과는 Fig. 4.43 ~ Fig. 4.45와 같이 나타났다. 최종적인 Hook-up 설치 절차는 원형 표식의 검은색 실선으로 표시하였다. 구조물이 이송되어 설치 해역에 도착하면 4대의 예인선을 이용하

여 구조물의 위치를 유지하면서 설치 작업을 수행한다. 6번째 계류삭을 연결하는 단계(#6)가 끝나면 2대의 예인선은 철수하고 남은 2대의 예인선을 이용하여 12개의 계류삭이 연결될 때까지(12T 100%) 구조물의 위치를 유지한다. 이후 모든 예인선은 철수하여 예인선이 없는 상태에서 설치 작업을 진행한다. 이러한 절차는 구조물의 거동이 6m가 넘지 않게 구성하였다.

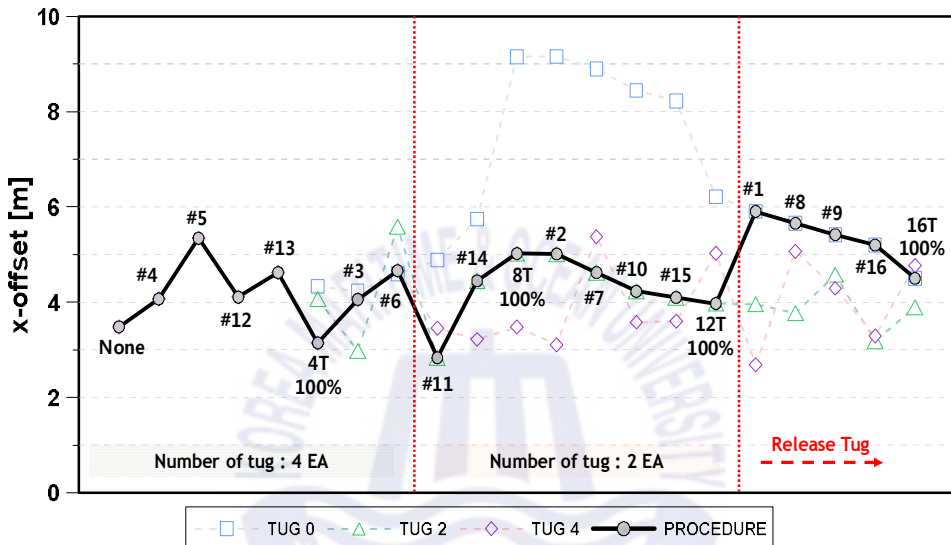


Fig. 4.43 Result of x -offset during hook-up installation

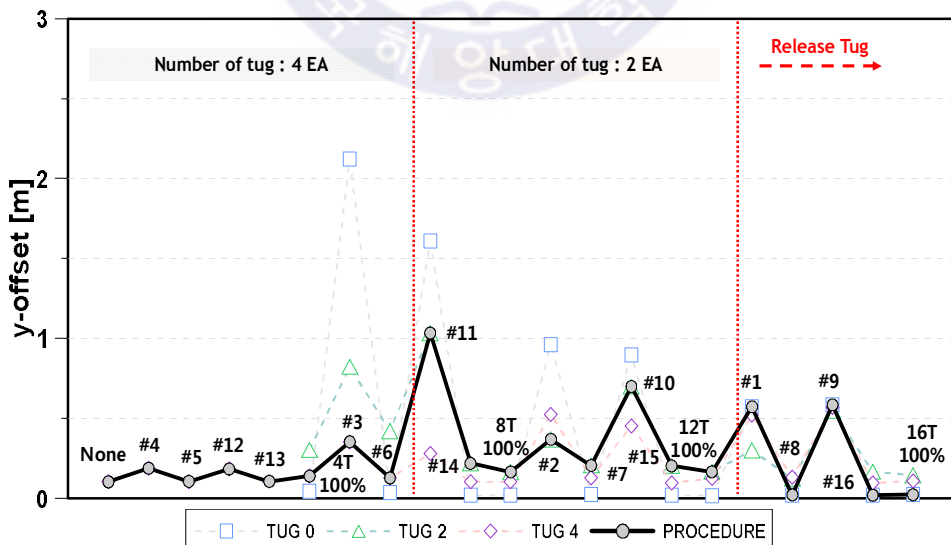


Fig. 4.44 Result of y -offset during hook-up installation

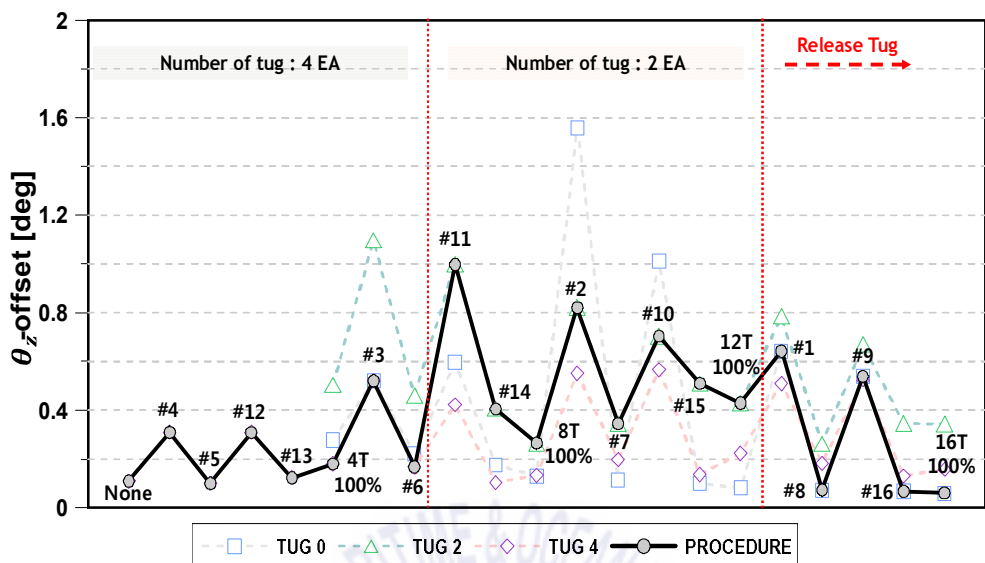


Fig. 4.45 Result of θ_z -offset during hook-up installation

제 5 장 결론

본 연구에서는 해양 설치작업인 Hook-up 설치 작업 동안 발생하는 구조물의 동적거동을 해석하기 위한 프로그램을 개발하고 일반적으로 수행되어지는 절차에 대해 검토하였다. 먼저 Hook-up 설치 작업 해석결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 개발된 프로그램 검증의 절차를 가지고, 설치 과정 중 각각의 외력(파랑, 조류, 바람)에 의한 구조물의 거동을 확인하였다. 이때 설치 과정 중 파랑에 의한 구조물의 큰 저주파수 운동을 확인하였다. 복합외력이 작용할 때의 구조물의 거동은 배치된 예인선의 개수에 따라 해석을 진행하고 유의 값을 이용하여 결과를 정리하였다. 예인선의 철수 시점은 파랑하중이 작용하는 방향의 구조물 거동이 6m가 넘지 않는 조건에서 결정하였다.

본 연구에서 도출한 결론은 다음과 같다.

(1) 개발된 프로그램과 상용 프로그램인 MOSES와 Motion response를 비교하였을 때 정량적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다.

(2) 본 연구에서 사용된 외력환경 중 구조물의 거동은 파랑하중이 지배적으로 작용하였으며, 계류라인이 비대칭적으로 설치되었을 때 y 방향과 θ_z 방향의 거동이 가장 크게 나타났다.

(3) 다수의 계류삭이 연결되더라도 구조물은 2차 파랑강제력으로 인해 큰 저주파수 운동이 발생할 수 있으며, 이때 여러 방향에서 파랑하중이 작용하게 되면 예상치 못한 큰 거동을 초래할 수 있다.

(4) Hook-up 설치 작업 중, 다수의 경우 전체 계류삭의 절반이 연결되면 모든 예인선이 철수하게 된다. 그러나 본 연구의 경우 전체 계류삭의 절반이 설치되었을 때 예인선이 철수하면 위험한 상황을 초래할 수 있으며 이에 대한 작업 안정성에 대한 검토가 필요하다.

(5) Hook-up 설치 절차는 본 연구에서 언급한 절차 이외에 다양한 절차가 존재한다. 추후 본 연구에서 언급한 절차 이외 다양한 절차에서의 검토 및 비교 분석이 진행되어야 한다.

(6) 계류삭 해석에 사용된 집중질량법은 점성에 의한 영향을 고려하지 않았다. 추후 점성에 의한 영향을 고려한 계류삭 해석이 요구되어진다.

(7) 본 연구를 통해 예인선이 언제 철수해야 안전한 작업 환경을 만들 수 있는지 확인하였고, 개발된 프로그램을 이용해 예인선의 최대 용량을 변수로 두어 작업에 필요한 예인선의 최대용량을 역으로 추정할 수 있다.

(8) 실제 Hook-up 설치 작업에서 예인선은 Tug master라 불리는 지휘자의 통제에 의해 구조물 위치를 유지한다. 이때의 상황을 고려한 예인선 알고리즘에 대한 검토가 필요하다.



참고문헌

Cummins, W.E. (1962) “The Impulse Response Function and Ship Motions” , Hamburg University, Symposium on Ship Theory.

Patel, M.H., Lynch, E.J., (1982) “Coupled dynamics of tensioned buoyant platforms and mooring tethers” , London Centre for Marine Technology, 5(4), pp 299-308.

Van den Boom, H., (1985) “Dynamic Behaviour of Mooring Lines” , Proceedings of the BOSS Conference, Delft, The Netherlands, 1-5 July 1985.

趙孝濟, (1991), “溪流式浮遊海洋構造物の応答特性に及ぼす多方向波の影響に関する研究” , 東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻博士課程.

Huang, Y.L., (1998), “Numerical Model Test for Mooring Damping” , Proc of the 17th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, OMAE98.

Lee, J.H. (2011) “Dynamic Analysis of Spar Hull Transportation” , Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 35(6), 867-873.

Son, Y.J. (2012) “탄성과 굽힘을 고려한 계류계 동적 거동 해석” , 석사학위논문.

Choi, J.H. (2017) “OpenFOAM을 이용한 catenary 계류시스템의 준정적 해석 프로그램 개발” , 석사학위논문.

Kim, Y.S., Kim, J.H., (2018). “Ice Load Generation in Time Domain Based on Ice Load Spectrum for Arctic Offshore Structures” Journal of Ocean Engineering and Technology, 32(6), 411-418.

Yoon, S.J., Kim, B.J., (2018.) “A Numerical Study for the Tension Characteristics of Fiber Rope Mooring System during Pre-laying Installation”

Journal of Ocean Engineering and Technology, Autumn Conference.

Seo, Y.J. (2019) “OpenFOAM을 이용한 계류 시스템의 동적 해석 프로그램 개발”, 석사학위논문.

